



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Industries Pétrochimiques**

Spécialité : **Génie du Raffinage**

Présentée par : **Guemmour Mourad**
GHOUATI Bouthaina

Thème

Décarbonation du gaz naturel par zéolithes synthétiques

Déposé le,

Devant le Jury :

Mme Hanane BERDAA	Présidente	M.A.A.	Univ-Tissemsilt
m. Mourad BIDAOUI	Encadreur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
M. Lahcen LOUCIF	Examineur	M.A.A.	Univ-Tissemsilt
M. Med Lamine CHEMRAK	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

Introduction générale 1

Partie théorie

Chapitre I : Généralités sur le gaz naturel

I.1. Introduction	4
I.2.L'origine du gaz naturel.....	4
I.3.Définition du gaz naturel.....	5
I.4.Composition chimique d'un gaz naturel	5
I.5.Les caractéristique du gaz naturel	5
I.5.1.Volume massique	6
I.5.2.La masse volumique	6
I.5.3.Densité	6
I.5.4.Pouvoir calorifique	6
I.6.Type de gaz naturel	7
I.7.Propriété de gaz naturel	7
I.7.1.Control de la qualité du gaz	7
I.7.2.Critères de la qualité	7
I.7.2.1.Concernant le transport et la distribution du gaz	7
I.7.2.2.Concernant l'utilisation	8
I.8. Les opération de production de gaz naturel	9
I.9.Le stockage	10

I.10.Le transport	11
I.11.Utilisation	11
I.11.1.Le marché résidentiel	11
I.11.2.Le secteur industriel	11
I.11.3.La production d'électricité	11
I.11.4.Industrie automobile	12
I.11.5.Piles à combustibles	12
I.12.Gaz naturel dans le monde	12
I.12.1.Production mondiale du gaz naturel	12
I.12.2.Réserves de gaz naturel	14
I.13.Le gaz en Algérie.....	14
I.13.1.Les réserves gazières en Algérie	15

Chapitre II :Généralités sur les zéolithes

II.1. Introduction	17
II.2.Définition de la zéolithe	17
II.2.1.Synthèse des zéolithes	17
II.3.Types des zéolithes	18
II.3.1.Zéolithe naturel	18
II.3.2.Zéolithe synthétique	19
II.4.Structure	21
II.4.1.La structure cristalline de la zéolithe	22
II.4.1.1.Structures en chaine	22
II.4.1.2.Aspect en forme de feuilles	22
II.4.1.3.Les structures-cadres	23
II.4.2.La structure du cadre des cristaux des zéolithes	23

II.5.Nomenclature	24
II.6.Application et utilisation des zéolithes	25
II.6.1.Agents déshydratants	25
II.6.2.Zéolithes comme échangeurs d'ions	25
II.6.3.Zéolithes comme adsorbants	26
II.6.4.Zéolithes comme catalyseurs	29
II.7.Propriétés des zéolithes	30
II.7.1.Propriétés acido-basiques	30
II.7.2.Hydrophobicité-Hydrophilicité.....	31

Chapitre III :Généralités sur dioxyde de carbone

III.1.Introduction	33
III.2.Définition	33
III.3.Caractéristique physico-chimiques du dioxyde de carbone CO ₂	34
III.4.Utilisations	36
III.4.1.Sous forme gazeuse	36
III.4.2.Sous forme liquide	36
III.4.3.Sous forme solide	37
III.5.Source d'émission du CO ₂	38
III.5.1.Source Humaines	38
III.5.2.Source Naturelles	40
III.6.Impacts émission de CO ₂	41
III.6.1.Impacts sur l'environnement	41
III.6.2.Impacts du CO ₂ sur la végétation	42
III.6.3.Impact du CO ₂ sur la santé humaine.....	42
III.7.Réduire les émissions de CO ₂	43
III.7.1.Réduire la consommation d'énergie	43
III.7.1.1.Dans le bâtiment	43

III.7.1.2. Dans les transports	44
III.7.1.3. Dans l'industrie	44
III.7.2. Choix énergétique et recherche	44
III.7.2.1. Réduire le contenu carbone de la production d'énergie	44
III.7.2.2. Capturer le CO ₂	45
III.7.2.3. Capturer et séquestrer le CO ₂	45
III.8. Le procédé de Captage	46
III.8.1. La capture CO ₂ en postcombustion	46
III.8.2. La capture CO ₂ par oxycombustion	47
III.8.3. La capture CO ₂ en précombustion	48
III.9. Stockage du CO ₂	49

Partie pratique

Chapitre IV : Synthèse d'un article

IV.1. Les propriétés des zéolithes à base cendres volantes synthétisées à l'aide de différentes méthodes par l'adsorption et régénération	51
IV.2. Méthode	53
IV.3. Résultats	55
IV.4. Expériences de sorption du CO ₂	58
IV.5. Discussion	60
Conclusion générale	63
Références bibliographiques	66
Résumé	73

Introduction général

Introduction générale

Le gaz naturel est un mélange de gaz d'hydrocarbures combustibles. Les constituants principaux du gaz naturel varient en fonction de leur source, ils sont généralement du méthane jusqu'à C_5^+ (les condensats), et d'autres hydrocarbures de masse moléculaire élevées. Certains composés aromatiques [BTX-benzène (C_6H_6), toluène ($C_6H_5CH_3$), et xylène ($CH_3C_6H_4CH_3$)] peuvent également être présents, ce qui soulève des questions de sécurité en raison de leur toxicité [1]. Le gaz naturel contient aussi des composés non-hydrocarbures tels que, l'azote (N_2), le dioxyde de carbone (CO_2), l'hélium (He), sulfure d'hydrogène (H_2S), la vapeur d'eau (H_2O), et d'autres composés sulfurés comme le sulfure de carbone (COS), mercaptans (par exemple, CH_3SH) et d'autres traces de gaz. Le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène sont généralement appelés « les gaz acides ».

Car ils forment des composés corrosifs en présence d'eau. L'azote, l'hélium et le dioxyde de carbone sont aussi appelés diluants, car aucun de ces composés brûle, donc ils n'ont pas de pouvoir calorifique. Le mercure peut également être présent soit comme un métal en phase vapeur ou comme un composé organométallique dans les fractions liquides. Les niveaux de concentration sont généralement très faibles, mais même à des niveaux de concentration très faibles, le mercure peut être nocif en raison de sa toxicité et ses propriétés corrosives (réaction avec d'alliages d'aluminium).

L'industrie chimique vient en tête et de très loin des grandes industries consommatrices d'énergie. Le pétrole et le gaz naturel sont les seules capables de répondre à l'accroissement des besoins actuels en énergie.

Le gaz naturel joue un rôle énergétique croissant. L'importance de ses réserves et les avantages qu'il présente sur le plan de l'environnement favorisent son utilisation.

Le traitement du gaz naturel représente donc un enjeu technique et économique important. En fonction du gisement, le gaz naturel peut contenir des quantités très variables de gaz acides (CO_2 , H_2S) et autres contaminants (eau, mercaptans...) qu'il est indispensable d'éliminer.

La présence du gaz carbonique (CO_2) dans le gaz naturel provoque la corrosion des équipements et des tuyauteries ainsi que le givrage (solidification) dus à la formation de cristaux de dioxyde de carbone " CO_2 " dans les zones de liquéfaction du gaz naturel fonctionnant à des températures très basses. Ainsi que le CO_2 se comporte comme diluant, réduisant la valeur énergétique du gaz tout en augmentant le coût de transport.

Introduction générale

L'opération d'élimination du CO₂ dite «Décarbonatation». La décarbonatation est effectuée par absorption chimique à l'aide du solvant monoéthanolamine «MEA».[2]

Les zéolithes sont des matériaux très répandus dans un grand nombre d'applications. Ce sont des minéraux naturels ou synthétiques utilisés à grande échelle dans l'industrie chimique moderne de la pétrochimie à l'agrochimie en passant par les détergents et la purification de l'eau.

La zéolithe utilisée dans ce travail est la zéolithe brute synthétique de type ZSM-5.

Ce travail est structuré en deux grandes parties :

La partie théorique, comporte trois (3) chapitres :

- ✓ **Chapitre I** : Le gaz naturel.
- ✓ **Chapitre II** : les zéolithes
- ✓ **Chapitre III** : Dioxyde de carbone.

Synthèse d'un article

Enfin, une conclusion générale synthétisant les résultats obtenus et les perspectives.

Chapitre I Le gaz naturel

I.1.Introduction :

Le gaz naturel est la source d'énergie fossile qui a connu la plus forte progression depuis les années 70.elle représente la cinquième de la consommation énergétique mondiale.

En raison de ces avantages économiques et écologiques, le gaz naturel devient chaque jour plus attractif pour beaucoup de pays. Les propriétés de ce produit, comme par exemple le faible intervalle de combustion qui le caractérise, en font l'une des sources d'énergie la plus utilisée après le pétrole.

Le gaz naturel est considéré comme un combustible plus propre et plus respectueux de l'environnement que la plupart des autres combustibles fossiles. Son avantage comparatif en matière d'environnement par rapport au charbon ou au pétrole réside dans le fait que les émissions de dioxyde de soufre sont négligeable et que les niveaux d'oxyde d'azote et de dioxyde de carbone sont plus faibles. Un plus grand recours à cette source d'énergie permettrait notamment de limiter les impacts négatif sur l'environnement tels que :les pluies acides, la détérioration de la couche d'ozone ou les gaz à effet de serre [4].

I.2.L'origine du gaz naturel

Il est généralement admis que le carbone et l'hydrogène contenu dans le gaz naturel provient des restes de plantes et d'animaux qui se sont accumulés au fond des lacs et des océans durant des millions d'années.

Après avoir été recouverts par des couches épaisses d'autres sédiments, le matériel organique s'est transformé en pétrole brut en gaz naturel sous l'effet de la pression exercée par ces différentes couches et la chaleur émise par le noyau terrestre.

Le pétrole et le gaz ont alors été expulsés hors des schistes argileux marins dans lesquels ils s'étaient déposés et de là, ont pénétré les roches sédimentaires poreuses.

Le pétrole et le gaz remontent alors à travers la roche, car moins dense que l'eau, qui remplis les pores[5], [6].

I.3. Définition du gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile présent naturellement sous forme gazeuse dans les roches poreuses du sous-sol. Utilisé comme source d'énergie, le gaz est composé d'hydrocarbure[7].

I.4. Composition chimique d'un gaz naturel :

La composition chimique d'un gaz est la nature des hydrocarbures et les autres constituants qu'il renferme, leur importance relative dans le mélange et leur fraction volumique et moléculaire.

La composition chimique d'un gaz est utilisée et étudiée pour la vaporisation et calculer certaines de ces propriétés en fonction de la pression et la température. On peut classer les gaz naturel selon leur origine en :

- ✓ Le gaz naturel bactérien :(biochimique)
C'est un gaz formé par l'action des bactéries sur les débris organiques qui s'accumulent dans les sédiments.
- ✓ Le gaz naturel thermique :
C'est un gaz formé par la dégradation thermique des sédiments qui porté à des températures et pression croissantes au cours de l'évolution des bassins sédimentaires, et donne à côté des hydrocarbures une large gamme de composés non hydrocarbures.
- ✓ Le gaz naturel inorganique :
- ✓ C'est un gaz inorganique qui se forme au cours de la formation des gaz hydrocarbures à faible proportion ,les gaz volcaniques et les sources hydrothermales contiennentparfois du méthane et des inclusions fluides des minéraux des roches métamorphiques ou magmatiques[8].

I.5. Les caractéristiques du gaz naturel :

Le gaz naturel est incolore,inodore et insipide, sans forme particulière et plus léger que l'air.

Il se présente sous sa forme gazeuse au de la de -161°C . Pour des raisons de sécurité, un parfum chimique, le mercaptan, qui lui donne une odeur d'œuf pourri, lui est souvent ajouté afin de permettre détecter une fuite de gaz éventuelle[5], [9].

I.5.1. Volume massique :

Représente le volume occupé par unité de masse du gaz, il est donc l'inverse de la masse volumique et s'exprime en m^3/kg .

I.5.2. La masse volumique :

C'est la masse de l'unité de volume du gaz exprimé en kg/m^3 , elle est fonction de la température et de la pression, on dehors des conditions spécifiées on se réfère à des conditions dites normales ou standards :

Condition normal : $T = 0^\circ\text{C}, P = 1\text{atm}$

Condition standard : $T = 15^\circ\text{C}, P = 1\text{atm}$

I.5.3. Densité :

Un gaz est défini par le rapport de sa masse volumique à celle de l'air dans les conditions déterminées de température et de pression.

I.5.4. Pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de la chaleur exprimée en KWh ou MJ, qui serait dégagée par la combustion complète de un (1) mètre cube normal (Nm^3) de gaz sec dans l'air à une pression absolue constante et égale à 1,01325bar, le gaz du l'air étant une température initiale de 0°C , tous les produits de combustion étant ramenés à 0°C et une pression 1,01325 bar.

On distingue deux pouvoirs calorifiques

$$\text{PCS} = \text{PCI} + \text{Chaleur latente d'évaporation}$$

➤ Pouvoir calorifique supérieur PCS :

- C'est la quantité de la chaleur exprimée en KWh ou MJ, qui serait dégagée par la combustion complète de (1m^3) un mètre cube normal de gaz.
- L'eau formée pendant la combustion étant ramenée à l'état liquide et les autres produits étant à l'état gazeux.

➤ Pouvoir calorifique inférieur PCI :

- ✓ Il se calcule en déduisant par convention, du PCS la chaleur de condensation (2511KJ /Kg) de l'eau formée au cours de la combustion et éventuellement de l'eau contenue dans la combustible[5].

I.6. Type de gaz naturel :

L'apparition d'une phase liquide dépend des conditions de température et de pression dans le réservoir en surface.

Ceci conduit à distinguer les cas suivants :

- Gaz sec : ne formant pas de la phase liquide dans les conditions de production, le gaz est concentré en méthane et contient très peu d'hydrocarbures plus lourds que l'éthane.
- Gaz humide : Formant une phase liquide en cours de production dans les conditions de surface, il est moins concentré en méthane.
- Gaz à condensat : Formant une phase liquide dans les réservoirs en cours de production, la phase condensée est riche en constituant lourds.
- Gaz associé : Coexistant dans le réservoir avec une phase huile (gisement de pétrole). Le gaz associé comprend le gaz de couverture (phase gazeuse présente dans le réservoir) et le gaz dissous[10].

I.7. Propriété de gaz naturel:

I.7.1. Contrôle de la qualité du gaz :

Le gaz naturel doit correspondre à des exigences de qualité pour être transporté, distribué et utilisé dans les meilleures conditions de sécurité des personnes et des ouvrages, la continuité des services et d'optimisation des performances chez l'utilisateur. [11.12].

I.7.2. Critères de la qualité :

I.7.2.1. Concernant le transport et la distribution du gaz : [12]

a- Point de rosée « eau » :

Le point de rosée « eau » est la température à laquelle se produit le début du changement de phases pour une température donnée. C'est une fonction croissante de la pression et de la teneur en eau dans le gaz. Cette variable est utilisée pour apprécier les risques associés à la présence d'eau. Cette dernière peut se condenser ou former de la glace ou des hydrates.

b-Teneur en H₂S et CO₂ :

Ces impuretés provoquent une corrosion acide de l'acier et du cuivre, en cas de condensation aqueuse, H₂S et CO₂ existants naturellement dans certains gaz. On limite leur concentration dans le gaz pour rendre la corrosion négligeable.

I.7.2.2. Concernant l'utilisation :**a- Indice de Wobbe :**

Ce paramètre est fondamental pour le fonctionnement des brûleurs de gaz à induction atmosphérique dont le débit calorifique est proportionnel à l'indice de Wobbe. Il permet aussi pour ce type de brûleurs de vérifier l'interchangeabilité des gaz naturels de qualités différentes.

b- Teneurs en produits odorants :

Les risques liés aux fuites de gaz exigent que celles-ci soient détectables, naturels contiennent des Mercaptans « R-SH » qui sont des odorants naturels. Les gaz naturels dont le niveau d'odeur naturel est nul ou insuffisant doivent subir l'odorisation complémentaire, et on utilise généralement le « Tetrahydrothiophene »THT. Ces derniers sont nécessaires pour la sécurité de l'utilisateur.

c-Teneur en mono oxyde de carbone :

La présence du « CO » peut entraîner des effets physiologiques très graves, mais aussi la formation de métaux carbonyles en présence de métaux tels que le fer, le nickel présents dans les réservoirs souterrains.

d-Teneur en Soufre totale :

Elle doit être limitée pour minimiser les émissions d'oxydes de soufre dans l'atmosphère et pour éviter les condensations acides des produits de combustion.

I.8. Les opérations de production de gaz naturel :

Le processus de production du gaz naturel est simple et très proche de celui du pétrole. Le gaz naturel est tout d'abord extrait du sol ou des océans par forage, puis transporté par voie terrestre (gazoducs) ou maritime jusqu'à une installation de nettoyage et de transformation pour être ensuite acheminé vers une zone de stockage et de traitement, puis envoyé vers des cavités creusées dans le sol ou des installations de stockage.

A. Exploitation :

L'exploitation est une étape très importante du processus. Au cours des premières années de l'industrie du gaz naturel, lorsque les connaissances dans ce domaine étaient encore limitées, les puits étaient uniquement creusés à l'intuition. Aujourd'hui, au regard des coûts d'extraction très élevés, les compagnies ne peuvent pas prendre le risque de forer n'importe où ; les géologues jouent alors un rôle essentiel en identifiant les poches de gaz naturel.

B. Extraction :

Le gaz naturel est extrait en creusant un trou dans la roche. Le forage peut être effectué sur terre ou en mer. Le matériel employé est fonction de la localisation de la poche de gaz et de la nature de la roche. Plusieurs tests doivent être effectués à ce stade du processus.

La méthode d'extraction la plus répandue est basée sur le recours à des équipements de pompage [4], [6].

C. Traitement :

À sa sortie du gisement, le gaz naturel n'est pas utilisable en l'état. Le gaz brut extrait est composé essentiellement de méthane, mais contient une quantité variable d'autres composants dont certains sont impropres à la consommation.

Le gaz naturel subit une série d'opérations de traitement ; ces opérations consistent :

✓ Séchage :

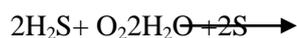
On sèche le gaz naturel en éliminant l'eau qu'il contient naturellement. Lors de sa combustion, la vapeur d'eau se dégage sous cette forme et elle n'est pas gênante. En revanche, à l'état liquide elle provoque la corrosion des canalisations.

On élimine l'eau du gaz par les procédés :

- Détente du gaz ou son refroidissement abaisse sa température : l'eau se condense.
- Lavage sélectif du gaz par un liquide hygroscopique : éthylène glycol (TEG).
- Adsorption de l'eau par des tamis moléculaires.

✓ Extraire les gaz acides :

L'extraction se fait essentiellement pour sulfurer d'hydrogène H₂S qui est à la fois toxique et corrosif, et le dioxyde de carbone CO₂ qui est également corrosif et de valeur thermique nulle.



✓ **Séparation des hydrocarbures (dégazolinage) :** Cette opération permet de récupérer les hydrocarbures lourds présents dans le gaz naturel : C₂, C₃ et C₄.

✓ Odorisation :

Le gaz naturel est inodore, incolore et sans saveur donc indétectable par les sens humains. L'odorisation est une mesure de sécurité qui consiste à communiquer au gaz naturel une odeur caractéristique qui ne puisse être confondue avec aucune autre et qui soit détectable par tous. Cette odeur varie selon le pays[11].

I.9. Le stockage :

Avant d'arriver chez le consommateur, le gaz naturel passe parfois par une phase de stockage (dans des réservoirs souterrains). De ce fait, l'industrie du gaz naturel peut faire face aux fluctuations saisonnières de la demande. Ces réservoirs sont habituellement situés à proximité des marchés finaux afin de permettre aux compagnies de distribution de gérer les pics de consommation et d'approvisionner leurs clients sans délai[4], [12].

I.10. Le transport :

Avec l'augmentation de la rentabilité des gisements, et développement du transport, plusieurs gisements qui étaient vus comme sub-commerciaux, sont maintenant profitables. Le moyen de transport le plus répandu est le gazoduc. Cependant, le GNL est en plein essor, transporté par méthanier, il offre une plus grande flexibilité d'approvisionnement, permet d'éviter les problèmes avec les pays de transit, et de diversifier les sources d'approvisionnement, en plus, au-delà d'une certaine distance, il devient moins cher que le transport par gazoduc[13], [14].

I.11. Utilisation :

Le gaz naturel joue un rôle majeur dans l'approvisionnement énergétique, rôle qu'il devrait continuer à jouer dans le bouquet énergétique de demain

I.11.1. Le marché résidentiel

Il est connu surtout pour son usage domestique, le chauffage et la cuisson, et 300% de la consommation du gaz au niveau mondial et destinée à ce secteur.

I.11.2. Le secteur industriel

Le gaz naturel est utilisé comme matière première dans l'industrie chimique, notamment pour la pétrochimie et le raffinage. A titre d'exemple, on peut citer la synthèse de l'ammoniac, de l'urée, et la synthèse du méthanol utilisé comme base d'additif des essences. Au niveau mondial, la part du gaz utilisée comme matière première est très faible (4%) par rapport à son utilisation industrielle.

I.11.3. La production d'électricité :

Depuis dizaine d'année, le secteur électrique est devenu le moteur principal de l'augmentation de l'utilisation du gaz naturel dans le monde : une tendance qui devrait se poursuivre. Dans l'année 2020, le secteur électrique a absorbé environ 35% du gaz commercial contre 30% dans les années précédentes avec une demande importante de la part des pays émergents.

I.11.4. Industrie automobile :

Le gaz naturel peut être utilisé comme combustible pour les véhicules à moteur de deux manières :

En tant que gaz naturel comprimé(GNC), qui est la forme la plus répandue ou en tant que gaz naturel liquéfié (GNL).

I.11.5. Piles à combustibles :

La pile à combustible est un dispositif électrochimique qui permet de combiner l'hydrogène et l'oxygène contenus dans l'air afin de produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau.

I.12. Gaz naturel dans le monde :

I.12.1. Production mondiale du gaz naturel :

La concentration de la production de gaz naturel dans deux pays CEI (communions des états indépendants) et les Etats Unis qui contribuent pour plus de 50% à la production annuelle est très frappante.

Le classement des pays producteurs illustre surtout le problème lie au coût élevé du transport du gaz naturel hors CEI et USA. Les principaux producteurs sont proches des grandes marchés consommateurs : Canada (USA) Pays- Bas, Royaume-Uni et Algérie. **[15]**

L'offre mondiale était dans l'intervalle 2520-2890 Gm³/an en 2000, puis dans l'intervalle 2960-3640 Gm³/an en 2010. Cette croissance se ralentit ensuite dans les deux scénarios, le niveau d'offre potentielle en 2030 étant compris entre 3110 et 4130 Gm³/an. **[16]**

La répartition géographique de l'offre potentielle est présentée dans les tableaux(1et 2).

Tableau I.1 : Offre potentielle de gaz - Scénario haut (en.Gm³) [16]

Unité ;Gm ³ (10 ⁹ m ³)	Potentiel					
	réalise	1995	2000	2010	2020	2030
Année						
Afrique	82	136	199	229	230	
Asie Central & de l'est	77	142	187	224	255	
Asie de sud Est&océan	125	180	219	269	305	
Europe de l'Est-Asie du nord	698	984	1289	1397	1400	
Proche-Orient	143	242	373	476	552	
Amérique du nord	714	746	880	943	1026	
Amérique du sud	75	117	163	181	199	
Europe central&occidentale	250	344	330	269	166	
Monde	2,164	2,892	3,640	3,988	4,133	

Tableau I.2 : Offre potentielle de gaz - Scénario de référence (en Gm³) [16].

Unité ;Gm ³ (10 ⁹ m ³)	Potentiel					
	réalise	1995	2000	2010	2020	2030
Année						
Afrique	82	134	168	189	192	
Asie Central& de l'est	77	116	142	155	165	
Asie de sud Est& océan	125	171	200	204	210	
Europe de l'Est-Asie du nord	698	714	893	947	950	
Proche-Orient	143	242	331	408	464	
Amérique du nord	714	734	801	833	854	
Amérique du sud	75	101	131	149	155	
Europe central&occidentale	250	318	290	203	117	
Monde	2,164	2,520	2,956	3,088	3,107	

L'offre potentielle augmente régulièrement en toutes régions, sauf en Europe Centrale & Occidentale où elle commence à décliner lentement après l'an 2000. Cette baisse n'est significative qu'après 2010 ce qui est une évolution favorable par rapport au précédent rapport où la chute entre 2000 et 2010 fût assez rapide. On notera en outre que des réserves importantes se trouvent à des distances de transport moyennes dans les régions environnant l'Europe Centrale & Occidentale. Les prévisions relatives à l'offre enregistrent des variations mineures comparées à celles des études précédentes. [15]

I.12.2. Réserves de gaz naturel :

La comparaison des taux d'épuisement des ressources d'hydrocarbures constate que le gaz naturel est une ressource énergétique relativement peu exploitée par rapport au pétrole brut. En janvier 2004 les réserves totales de gaz dans le monde sont estimées à 202,404 Gm³ plus de 2,2% par rapport à l'année de 2000 dont 146,800Gm³ de réserves récupérables prouvées de gaz représentent, en équivalent énergétique, plus de 95% des réserves prouvées de pétrole brut. La plus forte part(40%)des réserves totales se trouve en Europe de l'Est, Asie du nord. En ce qui concerne les réserves prouvées, elles se situent pour 38% en Europe de l'Est, Asie du nord et 31% au Proche-Orient, les parts des autres régions étant toutes inférieures à 10%. Par comparaison avec le pétrole brut, dont les deux tiers des réserves prouvées se trouvent au Proche-Orient, le gaz naturel représente une diversification géographique des sources d'énergie dans le monde. Après trois années de production, les réserves estimées ont encore augmenté de 4% rapport à celles du janvier 1999. L'augmentation est particulièrement importante dans les régions d'Europe de l'Est Asie du nord et d'Amérique du nord. Cette augmentation suit et confirme celle de 22% constatée en 1996 et 1999 et tient en grande partie à l'impact des nouvelles technologies sur le niveau de récupération des réserves avec des prix des énergies quasiment stables : l'essentiel de l'évolution est dû à de nouvelles estimations des ressources des champs de gaz déjà connus.

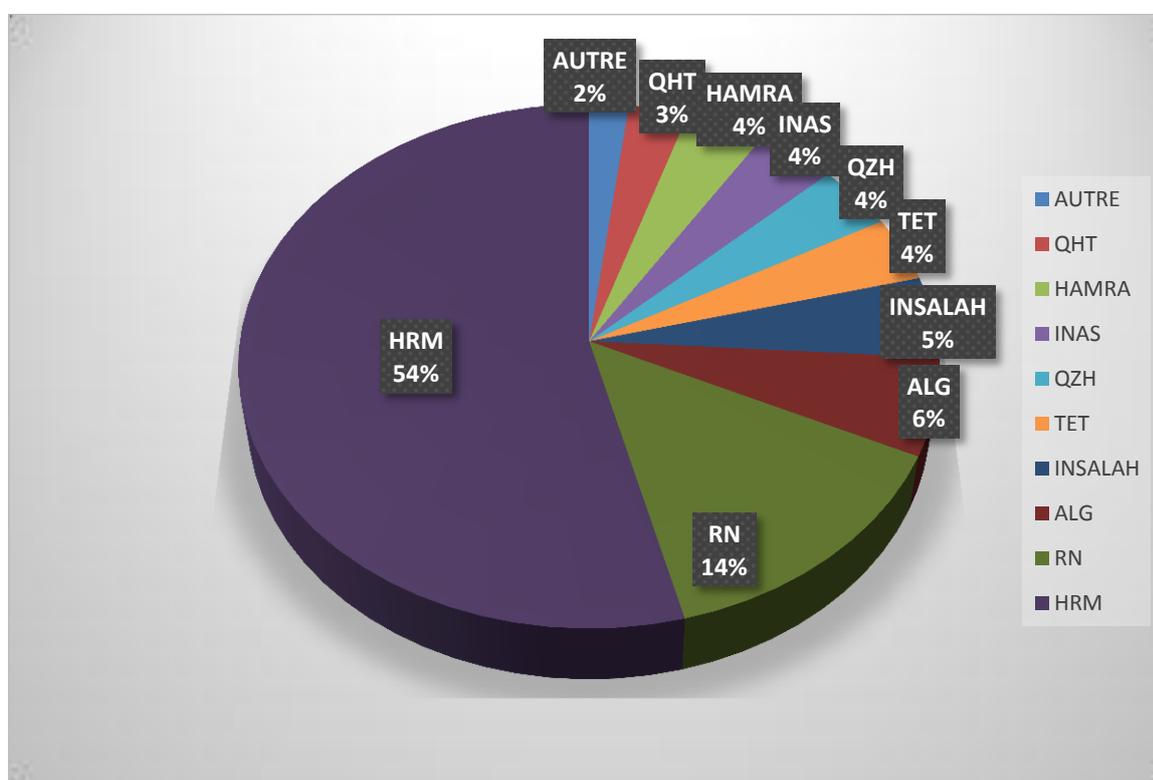
I.13. Le gaz en Algérie :

L'Algérie possède des réserves immenses en gaz naturel à savoir le champ de Hassi R'mel, qui est le plus grand à l'échelle mondiale et celui de Ain-Salah qui sera exploité à l'année 2002. L'Algérie se classe au quatrième rang en termes de réserves prouvées avec presque 4600 milliards de m³ considérés comme réserves probables et possibles. L'Algérie deviendra le premier exportateur dans ce secteur. [17]

Elle est également : deuxième producteur africain après le Nigeria avec une production annuelle de près de 152 milliards de m³, troisième exportateur mondiale de gaz naturel avec une capacité d'exportation de 65 milliards de m³, et tient la deuxième place dans l'exportation de GPL.

I.13.1. Les réserves gazières en Algérie :

En janvier 2003 les réserves prouvées de gaz naturel sont estimées à 4 ,077.109m³. Au cours des dix dernières années les bassins de Berkine et d’Illizi ont enregistré les taux de réussite les plus élevées dans l’exploitation, avec respectivement 51% et 50% parmi les autres bassins de Berkine qui se classe comme les plus fructueuses figures. Le bassin de Oued Mya ou ils ont effectué une autre découverte de gaz et de pétrole en 2002, ainsi que les bassins de Timimoun et Hassi Messaoud (voir figureI.1) Il est estimé actuellement que des investissements de l’ordre de 7 Milliard de \$devront être débloqués les prochaines années afin de développer toutes les découverte réalisées. [18]



FigureI.1 Répartition des réserves gazières an Algérie[18].

Chapitre IV

Synthèse d'un article

IV.1. Les propriétés des zéolites à base de cendres volantes synthétisées à l'aide de différentes méthodes par l'adsorption et régénération :

Natalia Czuma et all [75]. Sont intéressés à la production de zéolites à base de cendres volantes peut être une méthode intéressante pour l'utilisation des déchets solides du secteur de l'énergie. Les différentes méthodes de synthèse donnent souvent lieu à une variété de types de zéolites, ce qui influe sur les propriétés des matériaux obtenus. L'attention portée aux technologies de réduction des émissions de dioxyde de carbone, justifie pleinement l'étude des comportements de sorption des zéolites de cendres volantes synthétisées par différentes méthodes.

Le travail de cette équipe en 2019 étudie les propriétés de sorption des zéolites à base de cendres volantes synthétisées par différentes méthodes en utilisant du CO₂. La capacité de sorption et les isothermes d'adsorption ont été déterminées selon la méthode volumétrique et les paramètres texturaux ont été résolus selon la méthode Dubinin-Astakhov (DA).

La capacité de sorption du CO₂ était comprise entre 0,24 et 4,16mmol/g.

Les relations entre structure et le comportement de sorption ont été étudiées pour chaque méthode de synthèse. De fortes similitudes entre les zéolites commerciales et les zéolites de cendres volantes. Le mécanisme de sorption s'est avéré être physisorption qui est entièrement réversible dans des conditions sélectionnées. Les tendances observées ont été utilisées pour identifier le meilleur sorbant.

On pensait que l'augmentation de la quantité de CO₂ causée par les émissions anthropogéniques (dont on a récemment observé qu'elles dépassent les 400 ppm) entraîne un changement climatique mondial. Actuellement, de nombreuses actions politiques et écologiques visent à limiter les émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

La difficulté d'éviter les émissions dans de nombreux secteurs justifie pleinement les efforts déployés pour capturer le dioxyde de carbone. La méthode la plus courante repose sur l'utilisation d'amines liquides pour l'élimination du CO₂ des gaz de combustion. Toutefois, ce procédé présente certains inconvénients en raison de la dégradation des amines, ce qui entraîne une faible efficacité de captage du CO₂, des besoins énergétiques élevés en matière de régénération et des effets corrosifs sur les équipements de séparation [76].

Il est donc nécessaire d'explorer des différents matériaux pour le captage du CO₂. L'une des possibilités est l'utilisation de technologies basées sur des processus d'adsorption. Les adsorbants doivent être rentables (matières premières à faible coût), avoir une faible capacité thermique, une cinétique rapide, une capacité d'adsorption du CO₂ et une sélectivité élevées, ainsi qu'une stabilité thermique, chimique et mécanique en cas de cycles intensifs [77].

Les adsorbants les plus intéressants sont les charbons actifs, les zéolithes et les MOF. Les MOF sont actuellement d'une grande importance pour la capture du CO₂ car ils présentent une microporosité élevée, une d'ajustement chimique et de fonctionnalité de surface par rapport aux zéolites poreuses classiques et au charbon actif. Bien que ces adsorbants fonctionnent bien dans les technologies de CSC, ils peuvent ne pas être suffisants dans les processus de postcombustion en raison des températures très élevées. En outre, les MOF sont extrêmement coûteux par rapport aux zéolites et au charbon actif. Leur prix est estimé à environ 130-200 \$/kg [78]. Le charbon actif est l'un des adsorbants solides les plus utilisés pour le captage du CO₂.

Cela est dû à son caractère microporeux, à la distribution adéquate de la taille des pores, à son faible coût et à sa facilité de régénération. Cependant, la sélectivité CO₂/N₂ du charbon actif est relativement faible. Pour afin d'adapter les propriétés des charbons actifs à la sorption du dioxyde de carbone, des modifications de la surface peuvent être nécessaires, ce qui augmente le coût de ces matériaux. Les zéolites ont été proposées comme adsorbants physiques potentiels du dioxyde de carbone et leurs efficacités d'adsorption dépendent de la taille, de la densité de charge, et de la composition chimique des cations dans leurs structures poreuses[79].Le captage du dioxyde de carbone à l'aide de zéolithes présente certains avantages par rapport aux procédés de capture qui utilisent des sorbants à base de carbone. L'un de ces avantages est la sélectivité plus élevée du dioxyde de carbone par rapport à l'azote, ce qui permet de produire des flux de dioxyde de carbone hautement purifiés. Le prix de la zéolite commerciale zéolite commerciale commence à 100 \$/kg. Les zéolithes naturelles sont les moins chères de toutes les matières mentionnées ci-dessus.

Il convient de noter que la disponibilité de cette ressource naturelle est limitée. Une autre méthode de production de zéolithes consiste à utiliser les cendres volantes comme matière première, car la composition chimique des cendres volantes est souvent appropriée à cette fin [80].Cendres volantes Les zéolithes sont des adsorbants peu coûteux et leur processus de production permet une utilisation complète des déchets [81].

Depuis les premières recherches sur la synthèse de zéolithes à partir de cendres volantes [82], un grand nombre d'études ont été menées pour explorer différentes méthodes de synthèse, y compris les méthodes alcalines classiques et les méthodes de synthèse à partir de cendres volantes. Différentes méthodes de synthèse, y compris la conversion alcaline classique, la fusion alcaline, la conversion à sec (sel fondu) et un procédé en deux étapes (par exemple, la fusion alcaline). Et un processus en deux étapes (voir par exemple Querol et al. 2002, et leurs références). Chacune des méthodes proposées présente avantages et des inconvénients. Par exemple, la production de zéolite par la méthode de fusion est efficace, mais le processus est compliqué et exige de l'énergie. Est compliqué et énergivore ; la conversion à sec permet de réduire les déchets générés dans le processus, mais les zéolithes synthétisées présentent des propriétés qui limitent considérablement leur utilisation. Le coût des zéolithes synthétisées par voie hydro thermique à l'échelle semi-industrielle a été estimé entre 40 et 96 dollars par kilogramme [83-84]. Dans le cas d'une synthèse en deux étapes le coût serait similaire. Il n'existe pas de données concernant le coût de la synthèse des zéolithes à base de cendres volantes par la méthode de fusion à une échelle supérieure à celle du laboratoire.

Méthode de fusion à une échelle supérieure à celle du laboratoire. Au fur et à mesure que la technologie de sélection et de modification des adsorbants progresse, de nouvelles méthodes de synthèse seront mises au point. De nouvelles méthodes de synthèse seront mises au point.

Dans cet article, des zéolithes ont été synthétisées à l'aide de procédés hydrothermaux (H), de fusion (F) et d'un procédé modifié en deux étapes (TS). Les propriétés de sorption et le rendement de production ont été évalués pour chaque méthode.

IV.2.Méthode :

Les zéolithes ont été synthétisées à partir de matières premières de cendres volantes suivant trois méthodes différentes : hydrothermale (Zarębska. et al. 2015), fusion (Czuma et al. 2017) et une procédure modifiée en deux étapes (Czuma et al. 2019). Les teneurs en éléments majeurs et mineurs ont été déterminées par analyse de fluorescence aux rayons X (XRF) avec un spectromètre Philips PW 1404 de Philips. L'identification des minéraux a été réalisée par diffraction des rayons X sur poudre (XRD) à l'aide d'un diffractomètre Philips X'pert APD (avec un goniomètre PW 3020), avec une cathode en cuivre et un

monochromateur en graphite (dans une gamme de degrés 2θ de 5-50). Une gamme de degrés 2θ de 5-50°, avec un pas de 0,02° et un temps de mesure de 1 s par pas). Un spectromètre FT-IR ThermoScientific

Nicolet 6700 FT-IR équipé d'un détecteur DTGS-CsI et fonctionnant dans une gamme de spectres de 400 cm^{-1} à 4000 cm^{-1} 164 balayages et un espacement de 4 points de données ont été utilisés pour la caractérisation par spectroscopie infrarouge. La microscopie électronique à balayage a été réalisée avec une station de travail Neon 40 Crossbeam, fonctionnant à 15 keV.

Les mesures de surface spécifique (S_{BET}) des cendres volantes brutes et des zéolithes synthétisées ont été effectuées avec un analyseur Micrometrics ASAP 2020.

Micrometrics ASAP 2020 et calculées en utilisant la forme linéaire de l'équation de Brunauer-Emmett-Teller (BET) en supposant une surface de 0,162 nm^2 pour la molécule de N_2 adsorbée.

Les isothermes d'adsorption-désorption de l'azote ont été déterminées à la température de l'azote liquide (77K). Les expériences de sorption par la méthode volumétrique ont été réalisées à l'aide d'un équipement permettant des mesures précises de sorption physique et de chimisorption, avec un adaptateur de vapeur et un spectromètre de masse Autosorb-1-C (Quantachrome Instruments, USA). Les échantillons ont été préchauffés à 473K pendant 12h en utilisant un dégazeur équipé d'un système de vide avec une pompe turbomoléculaire. Les mesures ont été effectuées à température ambiante. Les analyses thermogravimétriques (TGA) ont été réalisées avec un analyseur TA Instruments Q50.

Des échantillons d'environ 10 mg ont été placés dans le four, chauffés à 458K (10K/min) dans une atmosphère d'azote inerte, maintenus à température constante pendant 20 minutes et ensuite refroidis à 323K. Lorsque la température a atteint 323K, le flux de gaz a été remplacé par du dioxyde de carbone et maintenu pendant 40 minutes dans des conditions isothermes. Conditions isothermes. Cette procédure a été répétée pour trois cycles de sorption-désorption.

IV.3.Résultats

-Caractérisation des matériaux :

Les cendres volantes résultant de la combustion d'une houille pulvérisée ont été collectées dans le conteneur cumulatif de la centrale électrique polonaise. Ces matériaux peuvent être classés comme des cendres volantes de classe F standard, conformément à la norme ASTM C618 (2019).

L'étude minéralogique (DRX) des matières premières montre que les cendres volantes sont principalement composées de mullite et de Quartz, avec un peu de calcite (Fig. 1a). L'augmentation de l'intensité du motif de halo DRX dans le domaine 2θ entre 20° et 35° suggère la présence d'un composant amorphe significatif dans l'échantillon [85]. Le traitement avec différentes méthodes de synthèse ont donné lieu à la formation d'au moins trois types différents de zéolites : A et P1 dans la méthode hydrothermale A et X avec la méthode de fusion, P1 et sodalite lorsque les échantillons de cendres volantes ont été soumis à la méthode de synthèse des zéolithes en deux étapes (Fig. 1).

Méthode de synthèse des zéolithes en deux étapes (Fig. 1b-d, respectivement).

La caractérisation des matériaux par FTIR (Fig. 2) montre les différences entre la cendre volante de départ et les matériaux synthétisés. Où l'on peut observer les bandes caractéristiques suivantes de la zéolite : bandes à environ 3500 cm^{-1} sont associées à la vibration d'étirement des groupes hydroxyles OH^- ; les bandes à 1600 cm^{-1} sont caractéristiques du mode de flexion de la molécule d'eau ; les bandes à 1000 cm^{-1} sont liées à la vibration interne asymétrique.

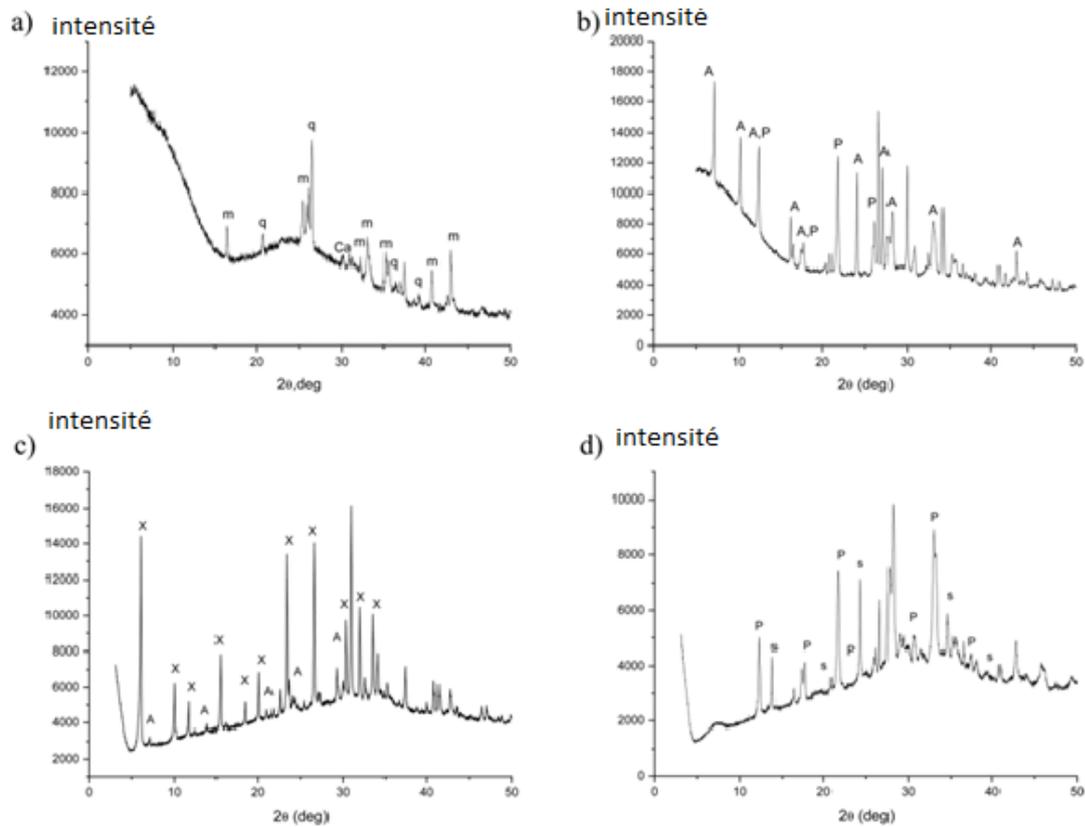


Figure IV .1 Analyses DRX des cendres brutes de fy (a) et des échantillons synthétisés par les méthodes H (b), F (c) et TS (d) (étiquettes : m=mullite ; q=quartz ; Ca=calcite ; X=zéolite ; A=zéolite A ; P=zéolite P1 ; s=sodalite).

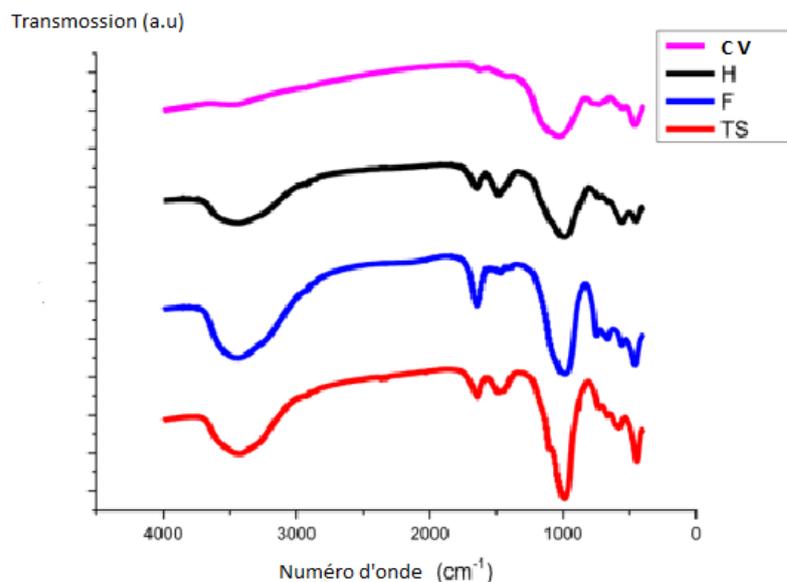


Figure IV. 2 Analyse IR des cendres volantes de départ et des zéolites synthétisées.

Les isothermes d'adsorption d'azote à basse température sont présentées dans la (Fig. 3.)

Les paramètres texturaux suivants ont été calculés à partir des isothermes d'adsorption d'azote à basse température (77K): surface spécifique (modèle BET), volumes des micropores (modèle DubininRadushkevich-DR) et volume total des pores à $p/p_0=0,95$. Volume des pores à $p/p_0=0,95$. Les résultats sont présentés dans (le tableau 1)

Tableau IV. 1 : Comparaison des valeurs S_{BET} pour les échantillons examinés.

Symbole de l'échantillon	S_{BET} m ² /g	volume microporeux (DR), cm ³ /g	Volume poreux total en% $p/p_0=0,95$ cm ³ /g	% de volume micropore
Cendre volante	2	-	-	-
H	39	0.016	0.138	12
F	414	0.188	0.251	75
TS	34	0.013	0.069	19

IV.4. Expériences de sorption du CO₂ : Les expériences de sorption du dioxyde de carbone ont été réalisées en utilisant deux méthodes différentes fournissant des informations complémentaires. L'objectif était de réaliser une étude comparative de la capacité de sorption, paramètres texturaux et des possibilités de régénération préliminaire entre les matériaux synthétisés et deux zéolithes commerciales. Une telle comparaison a permis d'évaluer leur potentiel d'utilisation. La distribution de la taille des pores (PSD) des échantillons a été déterminée par la mesure d'une isotherme d'adsorption du CO₂. Les mesures de la DSP sont généralement effectuées avec de l'azote ou de l'argon à 77K et 87K, respectivement. A ces basses températures, les limitations cinétiques peuvent avoir un effet sur le processus atteignant l'équilibre pendant les mesures isothermes.

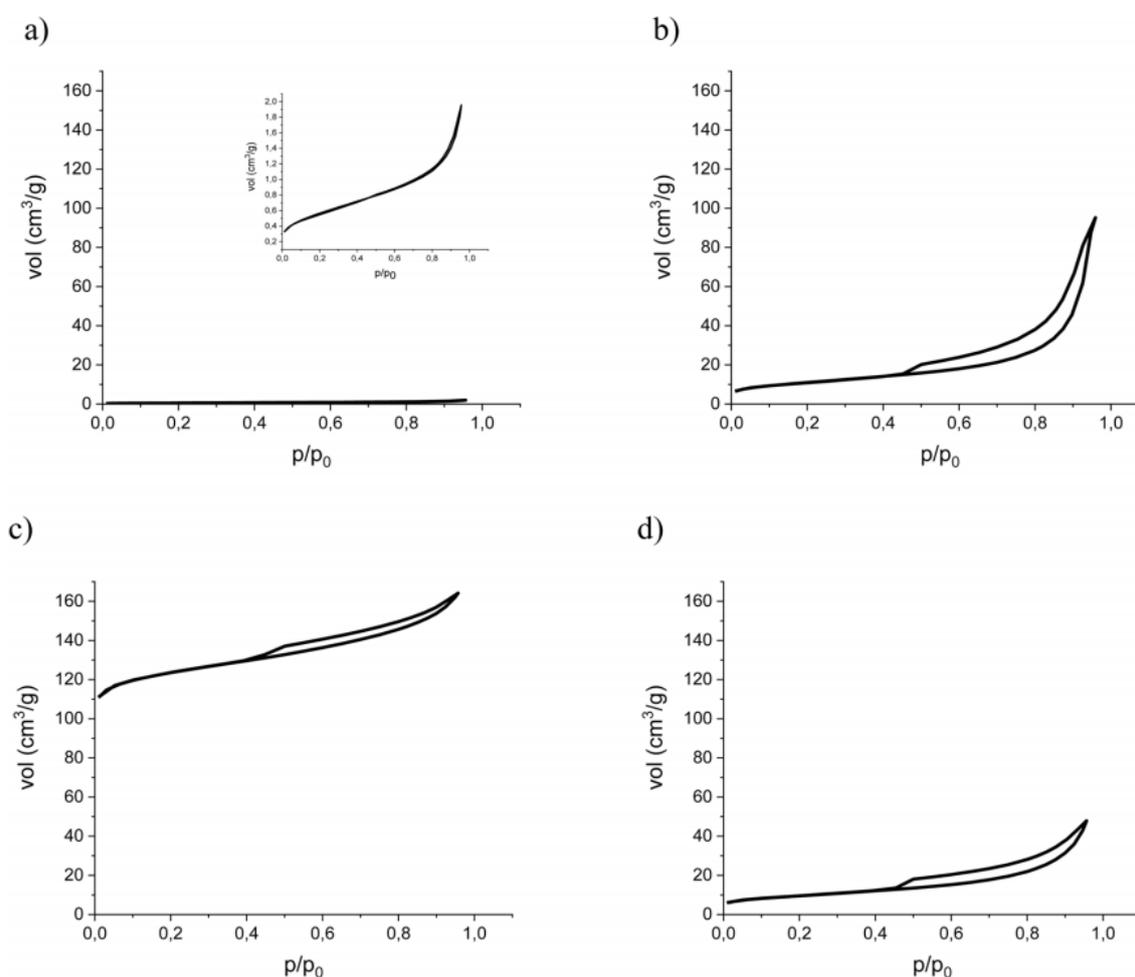


Figure IV.3 : Isotherme d'adsorption d'azote à basse température des cendres volantes brutes (a), et des zéolithes synthétisées par les méthodes hydrothermale (b), de fusion (c) et en deux étapes (d).

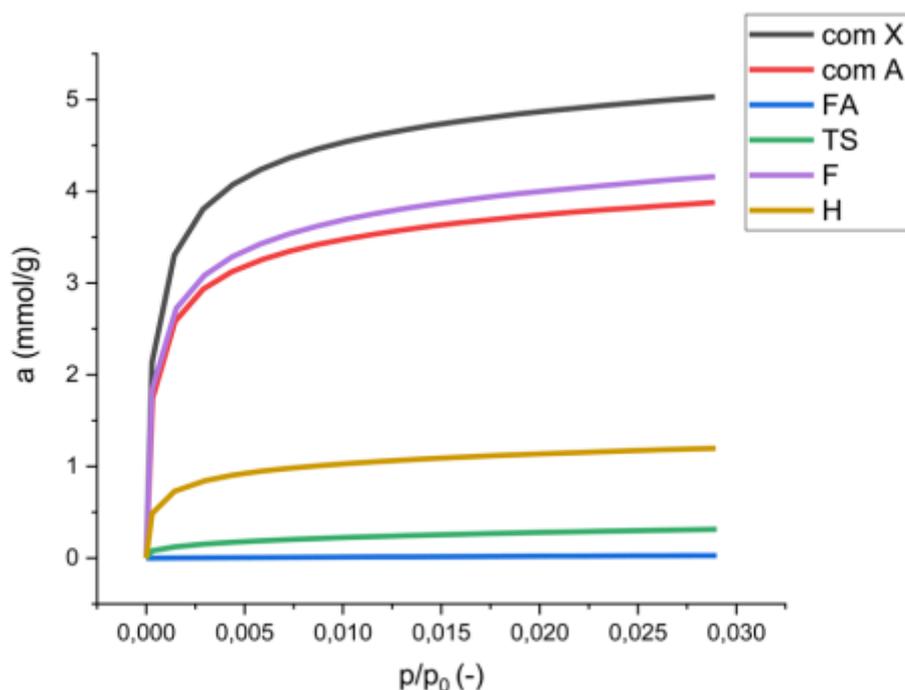


Figure IV.4 Expérience de sorption volumétrique réalisée sur des cendres non traitées (FA), sur un échantillon de zéolithe de cendres volantes (H), sur un échantillon de zéolithe de cendres volantes F cendres (F), TS cendres volantes(TS), zéolithe commerciale A (com A), zéolithe commerciale X (com. X).

Tableau IV.2 : Comparaison des résultats de l'essai de sorption volumétrique du dioxyde de carbone avec les paramètres texturaux calculés à partir des isothermes du dioxyde de carbone.

Symbole de l'échantillon	DA micropore Volume, cm^3/g	SDA Surface m^2/g	DA Pore diamètre, nm
cendres volantes	0.006	11	1.2
H	0.070	162	0.86
F	0.227	549	0.84
TS	0.043	50	1.06
Zéolithe commerciale A	0.202	506	0.84
Zéolithe	0.261	652	0.84

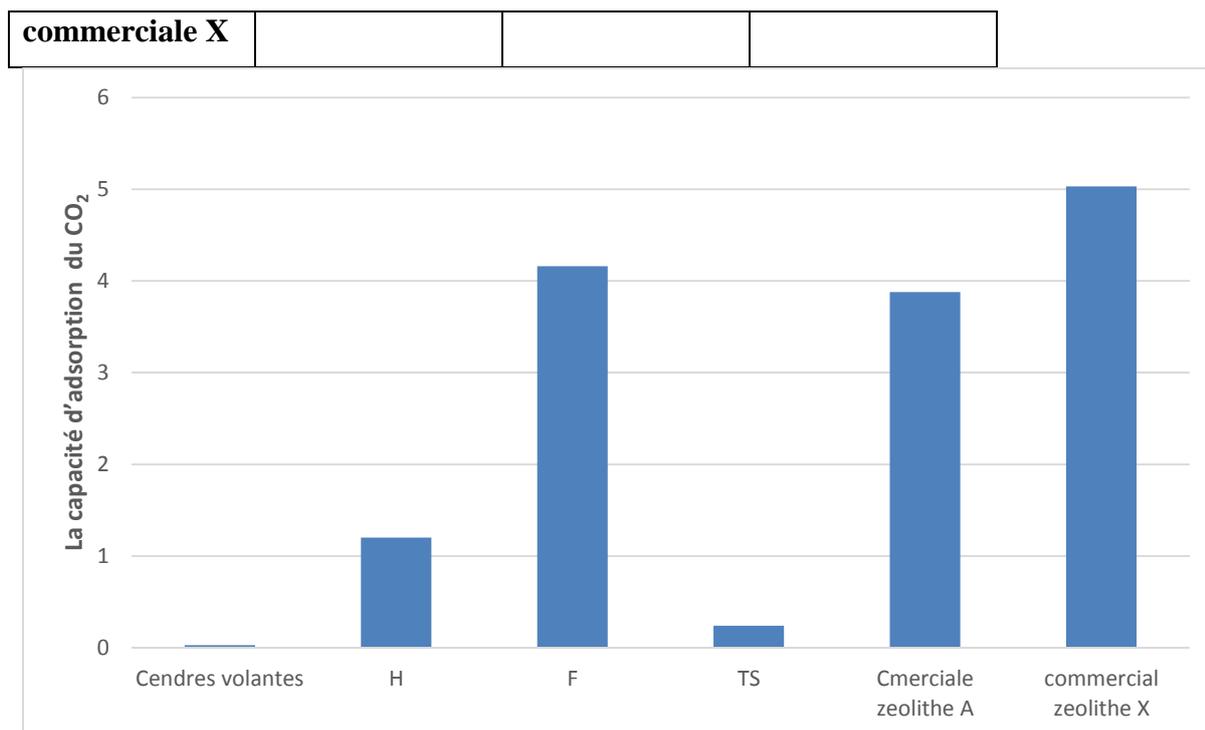


Figure IV.5 La capacité d'adsorption du CO₂ de différentes l'échantillon.

IV.5.Discussion

Les zéolites synthétisées à partir de cendres volantes par différentes méthodes ont montré des efficacités de conversion et des capacités de sorption du dioxyde de carbone différentes. Les mesures volumétriques ont indiqué que la méthode de fusion (F) a donné la meilleure capacité de sorption.

La capacité de sorption du dioxyde de carbone était environ trois fois supérieure à celle de la méthode hydro thermique (H) et presque 20 fois supérieure à celle de la synthèse en deux étapes (TS).

La meilleure capacité de sorption a été trouvée dans la synthèse en deux étapes (TS). La capacité de sorption des échantillons F et H augmente rapidement à de faibles valeurs de p/p_0 , indiquant la nature microporeuse de la surface de l'échantillon. Ceci est confirmé par la surface élevée calculée à partir des mesures de N₂ et de CO₂. La surface élevée calculée à partir des mesures de N₂ et de CO₂ explique le taux de conversion élevé observé des cendres volantes en zéolithe cristalline. Zéolithe cristalline. Les isothermes de Te des échantillons H et F sont similaires à ceux des zéolites commerciales A et X. Les cendres volantes non traitées

ne montrent aucun signe de conversion du dioxyde de carbone. Les cendres volantes non traitées ne présentent pas de propriétés de sorption du dioxyde de carbone.

Bien qu'il soit difficile d'établir une corrélation quantitative avec les paramètres physiques déterminés par les autres procédures expérimentales et de caractérisation, il s'agit d'une preuve que la base microstructurale est l'explication de l'observation selon laquelle la méthode de fusion donne l'efficacité de conversion la plus élevée de toutes les méthodes étudiées dans cette étude. L'observation que la méthode de fusion donne la plus grande efficacité de conversion de toutes les méthodes étudiées dans ce travail.

Chapitre III

Dioxyde de carbone

III.1.Introduction

Le dioxyde de carbone est l'un des principaux gaz à effet de serre dont les émissions d'origine anthropique contribuent au réchauffement climatique. L'une des solutions envisagées afin de limiter les émissions de CO₂ est de le capter sur les sites où il est produit en grandes quantités et/ou fortes concentrations puis de le stocker sous pression par injection dans des formations géologiques souterraines. Les principaux secteurs concernés sont ainsi ceux de l'industrie (raffineries, cimenteries, sidérurgie) et de l'énergie (centrales thermiques).

Les centrales thermiques (charbon, cycle combiné gaz) pour la production d'énergie sont responsables d'environ un tiers des émissions mondiales CO₂, avec plus de 5000 sites de 600 à 750 MW [55].

III.2.Définition :

Le CO₂, gaz incolore, inerte et non toxique, est le principal gaz à effet de serre à l'état naturel, avec la vapeur d'eau. Sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 100 ans. Il est produit lorsque des composés carbonés sont brûlés et en présence d'oxygène. Ses sources naturelles sont très nombreuses : éruptions volcaniques, respiration des plantes, des animaux et des hommes, incendies naturels de forêts, décomposition de la matière organique morte de plantes et d'animaux... Sous l'action de l'homme, le taux de CO₂ dans l'atmosphère augmente régulièrement et notamment de 30% au cours des deux derniers siècles. En France, au cours des 20 dernières années, 70% à 90% des émissions de dioxyde de carbone proviendraient de la combustion des carburants d'origine fossile. L'agriculture et la sylviculture contribueraient pour 12% des émissions de dioxyde de carbone [56].

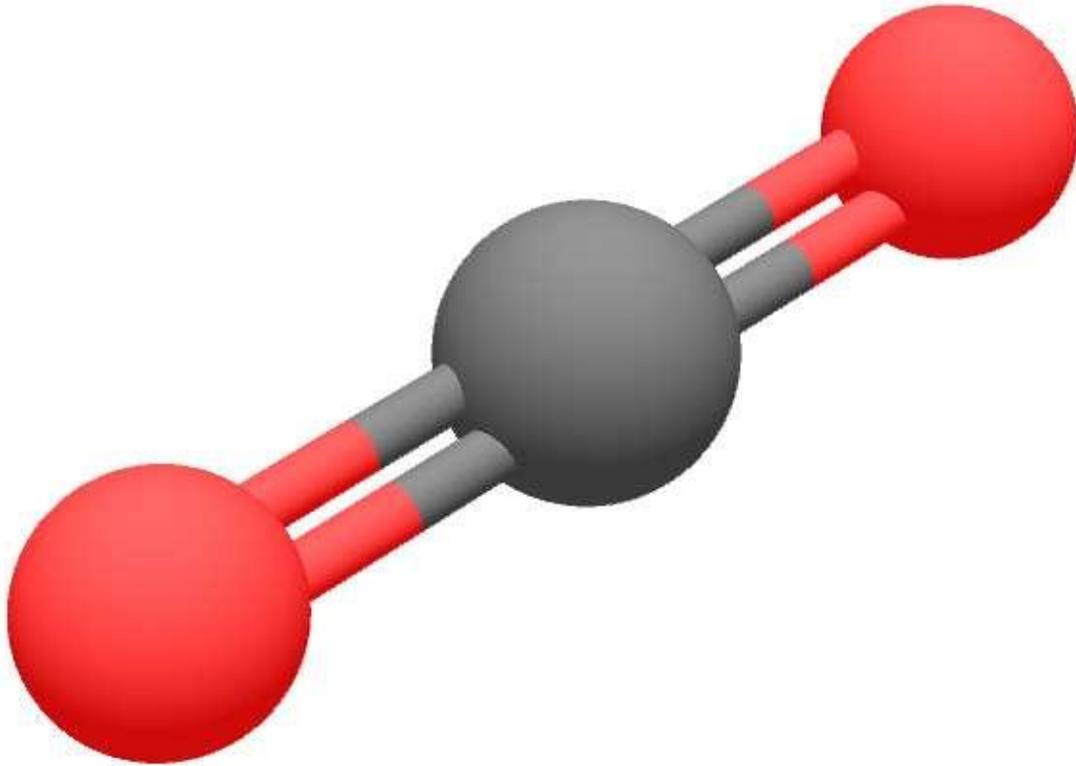


Figure III.1 Structure en 3 D du dioxyde de carbone Frédéric Marbach GNU[57].

III.3. caractéristiques physico-chimiques du dioxyde de carbone CO₂ :

- ✓ Le CO₂ se dissout dans l'eau et forme avec elle de l'acide carbonique (H₂CO₃).
- ✓ Le CO₂ à partir d'une certaine concentration dans l'air, s'avère dangereux voire mortel.
- ✓ Le CO₂ est le deuxième gaz à effet de serre le plus important dans l'atmosphère après la vapeur d'eau[58].

Le tableau (TableauIII.1) regroupe quelques propriétés de ce gaz [59].

TableauIII.1: les propriétés physique et thermochimique de CO₂

	Propriétés	Valeurs
Générales	<ul style="list-style-type: none"> - Formule brute - Nom IUPAC - Numéro CAS - Apparence 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ • Dioxyde de carbone • 124-38-9 • Gaz incolore
Physiques	<ul style="list-style-type: none"> - Masse moléculaire - Température de fusion - Température de vaporisation -Solubilité -Densité -Viscosité dynamique -Température critique - Pression critique -Point triple -Chaleur latente de vaporisation (0°C) - Chaleur latente de vaporisation(-16.7°C) -Chaleur latente de vaporisation (-28.9°C) - Chaleur latente de fusion (à-56.6°C) 	<ul style="list-style-type: none"> • 44.01g/mol • -78.5°C (195°K) • -57°C (216°K) • 1.45Kg/m³ • 1.87 Kg/m³(298°K 1.013bar)plus dense que l'air • 0.07 Cp à 78°C • 31.1 °C • 7.4MPa • -56.6°C à 519Kpa • 234.5KJ/Kg • 276.8KJ/Kg • 301.7KJ/Kg • 199KJ/Kg
Thermochimique	<ul style="list-style-type: none"> - $\Delta_f H^0$ gaz 	<ul style="list-style-type: none"> • -393.5KJ/mol

III.4 Utilisations :**III.4.1. Sous forme gazeuse :**

Le CO₂ a de nombreuses utilisations, dont :

- ✓ l'extinction des feux : beaucoup de centres de données (salles de serveurs d'ordinateurs) ou de salles d'archives sont équipés d'un système qui, en cas d'incendie, remplit la salle de CO₂ ce qui a pour effet d'éteindre le feu ;
- ✓ composant pétillant dans les boissons gazeuses ;
- ✓ en aquariophilie et culture sous serre pour une meilleure croissance des plantes ;
- ✓ en emballages à atmosphère contrôlée comme élément neutralisant ;
- ✓ en distribution d'eau potable, associé au carbonate, pour relever la dureté de l'eau (TH) des eaux trop agressives ;
- ✓ solubilisation du calcaire dans les eaux dures (TH supérieur à 25 °F) [60].

- ✓ composant nécessaire au phénomène de photosynthèse qui permet aux végétaux de croître en transformant les matières inorganiques en matières organiques constituant ainsi leur bois [61].

III.4.2. Sous forme liquide :

Sous forme liquide, il est utilisé comme :

- ✓ réfrigérant pour congeler certains aliments ;
- ✓ réfrigérant dans l'industrie électronique ;
- ✓ agent d'extinction dans les extincteurs dits « au dioxyde de carbone », on parle parfois de neige carbonique parce qu'une partie du CO₂ liquide se solidifie immédiatement à la sortie de l'extincteur en produisant une poudre blanche en mélange avec du dioxyde de carbone gazeux ;
- ✓ agent propulseur (et parfois également carbonatant) pour les boissons servies à la pression.

Quand il est utilisé comme fluide frigorigène, le CO₂ porte la dénomination de nomenclature industrielle « R744 ». Son utilisation comme fluide frigorigène tend à se démocratiser ces dernières années : il est considéré comme « frigorigène naturel », et son potentiel de réchauffement global est très faible comparé aux fluides frigorigènes « traditionnels ».

À pression atmosphérique, le dioxyde de carbone n'est jamais sous forme liquide. Il passe directement de la forme solide à la forme gazeuse (sublimation)[61].

III.4.3. Sous forme solide :

Le dioxyde de carbone sous forme solide a de nombreuses appellations : « glace carbonique », « neige carbonique », « Carboglace »[62], « glace sèche ». Il est issu de la solidification du CO₂ liquide. On obtient de la neige carbonique qui est ensuite comprimée pour obtenir de la glace carbonique.

Dans sa phase solide, cette glace carbonique se sublime en ne laissant aucun résidu, avec une enthalpie de sublimation de 573 kJ kg⁻¹[63] (soit 25,2 kJ mol⁻¹), à -78,5 °C et à 1 atm. On lui a donc rapidement trouvé de multiples utilisations en tant que réfrigérant.

Il est commercialisé sous différentes présentations selon son usage :

- ✓ en granules (de la taille d'un grain de riz de 3 mm de diamètre) : essentiellement pour le nettoyage et le décapage cryogénique ;
- ✓ en bâtonnets (d'une longueur d'environ 16 mm) :
- ✓ pour la conservation, le transport des produits sous température dirigée (produits pharmaceutiques, transport de surgelés, transport d'échantillons, etc.),
- ✓ dans l'évènementiel : la glace carbonique dans l'eau forme un brouillard très dense qui glisse le long des parois du contenant ;
- ✓ pour la recherche fondamentale ou appliquée, par exemple :
- ✓ en chimie, comme réfrigérant en mélange avec un solvant organique (le plus souvent l'acétone) afin de mieux conduire la chaleur, plus rarement comme réactif. Dans ce domaine, on utilise le terme de « Carboglace » en France, ou juste « carbo » dans le langage parlé, et jamais le terme « glace sèche » qui est par contre privilégié au Québec ;

- ✓ pour la vinification : il ralentit la fermentation et évite l'oxydation ;
- ✓ en plaquette ou en blocs :
- ✓ pour le ravitaillement aérien (catering), les traiteurs, les pompes funèbres, etc. ;
- ✓ en pains :
- ✓ pour faire du brouillard épais (effets spéciaux, cinéma, vidéo).

Le dioxyde de carbone solide est également présent sous forme de neige carbonique aux pôles de la planète Mars, où il couvre pendant l'hiver local les calottes glaciaires (composées d'eau très majoritairement) et leurs périphéries, ainsi que sous forme de givre carbonique à plus basse latitude, en fin de nuit au début des printemps locaux (photographies prises par les atterrisseurs *Viking*, le rover *Sojourner*, l'atterrisseur *Phoenix*, et de nombreuses images HRSC). Des dépôts importants en sont géologiquement séquestrés au pôle sud [64].

III.5.Source d'émission du CO₂ :

Il existe à la fois des sources humaines que des sources naturelles d'émissions de dioxyde de carbone

III.5.1.Sources Humaines

Depuis la révolution industrielle, les sources humaines d'émissions de dioxyde de carbone se sont multipliées. Les activités humaines, telles que la combustion de pétrole, de charbon et de gaz, ainsi que la déforestation, sont les causes principales de l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Près de 87% des émissions de dioxyde de carbone attribuables à l'homme, proviennent de la combustion de combustibles fossiles, tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Le reste provient du défrichage des forêts et autres changements dans l'utilisation des sols (9%), ainsi que de certains procédés industriels, comme la fabrication de ciment (4%).

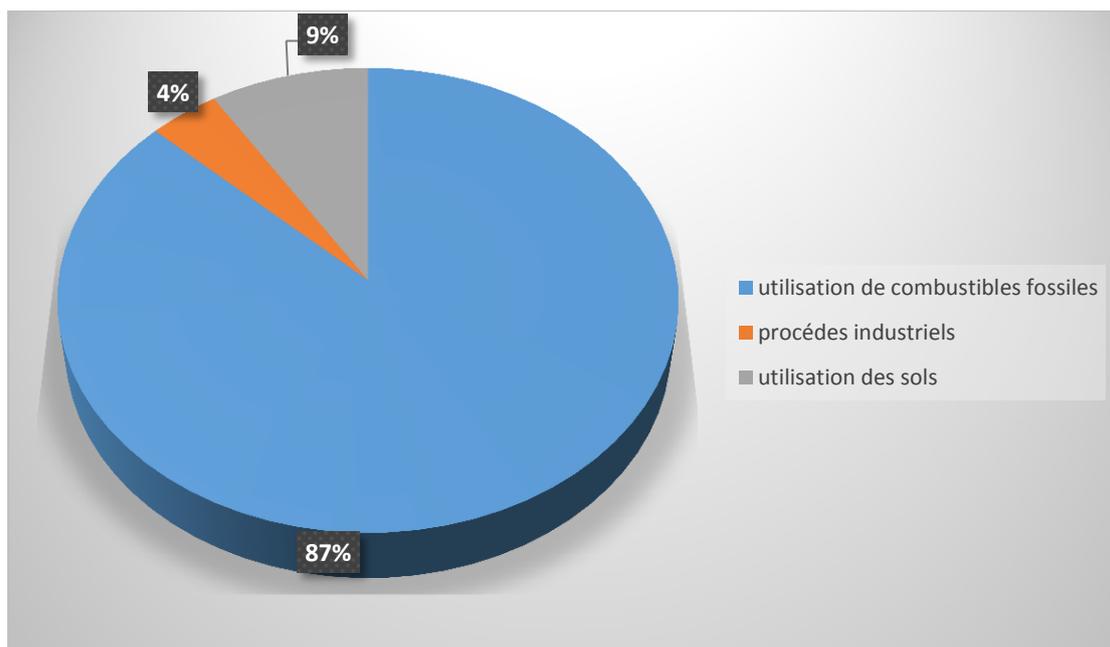


Figure III.2 Sources humaines de dioxyde de carbone [65].

-Utilisation des combustibles fossiles

La source humaine d'émissions de dioxyde de carbone la plus considérable provient de la combustion de combustibles fossiles. Cette activité produit 87% des émissions de dioxyde de carbone de source humaine. La combustion de ces combustibles libère de l'énergie, une énergie pour la plupart transformée en chaleur, en électricité ou en carburant utilisé dans le secteur des transports. Parmi quelques exemples d'usage de ces combustibles, citons les centrales électriques, les voitures, les avions et les installations industrielles. En 2011, l'utilisation de combustibles fossiles a créé 33,2 milliards de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone dans le monde.

Les 03 types de combustibles fossiles qui sont les plus utilisés sont le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Le charbon est responsable de 43% des émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles, 36% sont produites par le pétrole et 20% proviennent du gaz naturel.

-les trois secteurs principaux qui utilisent des combustibles fossiles sont :

- ✓ **Secteur électricité** : La production d'électricité et de chaleur est le secteur économique qui produit la plus grande quantité d'émissions de dioxyde de carbone attribuables à l'homme.
- ✓ **Secteur des transports** : Le secteur des transports constitue la deuxième source majeure d'émissions de dioxyde de carbone attribuable à l'homme.
- ✓ **Secteur industriel** : Le secteur industriel est la troisième source anthropogénique majeure d'émissions de dioxyde de carbone **[66]**.

III.5.2.Sources Naturelles :

En plus d'être produit par les activités humaines, le dioxyde de carbone est également libéré dans l'atmosphère par des processus naturels. Les océans, les sols, les plantes, les animaux et les volcans sont toutes des sources naturelles d'émissions de dioxyde de carbone.

Les sources humaines de dioxyde de carbone sont beaucoup plus faibles que les émissions naturelles, mais elles perturbent l'équilibre dans le cycle du carbone, un équilibre qui existait avant la révolution industrielle. La quantité de dioxyde de carbone produite par les sources naturelles est entièrement compensée par les puits naturels de carbone, et l'a été ainsi pendant des milliers d'années. Avant l'influence des êtres humains, les niveaux de dioxyde de carbone étaient assez stables en raison de cet équilibre naturel.

De toutes les émissions de dioxyde de carbone produites naturellement, 42,84% proviennent de l'échange entre l'océan et l'atmosphère. D'autres sources naturelles d'origine végétale et animale importantes, incluent la respiration (28,56%), ainsi que la respiration du sol et la décomposition (28,56%). Un faible montant est également issu des éruptions volcaniques (0.03%).

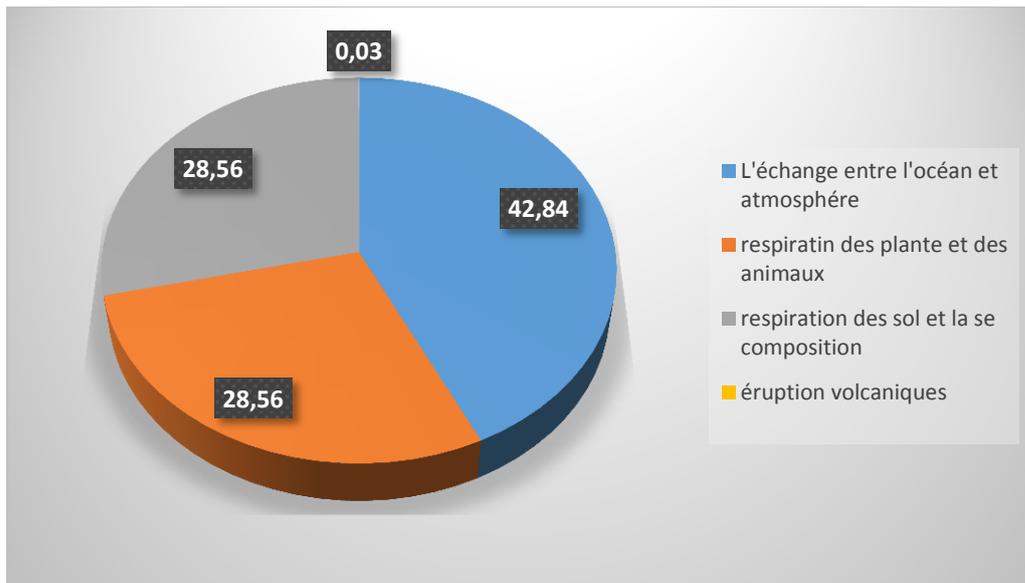


Figure III. 3 Sources Naturelles de dioxyde de carbone[67].

III.6.Impacts des émission de CO₂

III.6.1.Impact sur l'environnement

Une concentration trop élevée de dioxyde de carbone modifiera l'atmosphère. Le revers de la médaille, l'extraction de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel).

Conduisent à des émissions de gaz à effet de serre, en particulier des émissions de dioxyde de carbone. Ces ressources sont trompées par le carbone (C). Au cours du processus de combustion, en présence d'oxygène (O₂), les combustibles fossiles libèrent ce carbone sous forme de CO₂, et l'atmosphère est à l'envers.[68]

Les principaux gaz à effet de serre sont :

- ✓ La vapeur d'eau, qui compose à seule les trois quarts des gaz à effet de serre naturels ;
- ✓ Le dioxyde de carbone, qui est présent naturellement dans l'atmosphère ; sa concentration peut augmenter du fait d'éruptions volcaniques ou de feux, mais c'est surtout l'activité humaine depuis la révolution industrielle qui contribue à son augmentation ;
- ✓ Le méthane, qui est un gaz assez rare naturellement, et à l'effet de serre plus concentré que le dioxyde de carbone ; il est produit par la fermentation de

matières organiques, et l'agriculture intensive est en grande partie responsable de sa forte augmentation ;

- ✓ L'ozone, qui est présent naturellement dans la stratosphère (à 20 km de la terre) et qui absorbe les rayonnements ultraviolets dont il nous protège. Mais l'ozone qui résulte de l'activité humaine et est émis dans la troposphère (entre 0 et 10 km de la terre) est un gaz polluant très corrosif pour les voies respiratoires et les plantes[69].

III.6.2. Impact du CO₂ sur la végétation

A faible dose, le CO₂ favorise la croissance, mais des expérimentations dans des serres et des milieux naturels riches en CO₂ ont montré que cela n'est efficace que lorsqu'un certain seuil est atteint, au-delà duquel la croissance reste stable ou du moins. Au lieu de cela, le seuil variera selon le type d'usine considéré. On ne sait pas si cet effet va durer. Après quelques années, le phénomène d'acidification de l'environnement peut être l'inverse.

Rappelez-vous également que le dioxyde de carbone est la source de base de la photosynthèse, sans dioxyde de carbone, il ne peut y avoir de vie sur terre.

Les scientifiques de l'environnement et les chimistes atmosphériques ont confirmé dans les années 1990 que l'excès de dioxyde de carbone est une forme de pollution[68].

III.6.3. Impact du CO₂ sur la santé humaine

L'air contient aujourd'hui environ 0.04 % de CO₂. À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel. En raison des risques pour la santé que représente le CO₂, il est recommandé que l'exposition moyenne d'une personne sur une période continue de 8 heures ne soit pas supérieure à 5 000 ppm, soit une concentration de 0,5 %. Au-delà de ce taux, les conséquences pour la santé des occupants vont crescendo [70]:

- ✓ à partir d'une concentration de CO₂ de 2 % dans l'air, l'amplitude respiratoire augmente et des maux de tête peuvent se faire sentir après quelques heures ;
- ✓ la valeur d'exposition à ne pas dépasser lorsque le taux de CO₂ est de 3 % est de 15 minutes. A 3 %, le rythme respiratoire peut doubler, entraînant maux de tête, augmentation de la tension artérielle et réduction de l'acuité auditive ;
- ✓ à 4 %, la fréquence respiratoire peut être multipliée par 4 et un sentiment d'oppression peut se faire sentir ;
- ✓ à partir de 5 %, le CO₂ produit une odeur légèrement piquante. En plus de maux de tête et de la fatigue, l'impact du CO₂ sur la santé se fait sentir via une respiration difficile, une vue brouillée, une capacité de jugement altérée, voire une perte de conscience ;
- ✓ au-delà de 10 %, la personne exposée perd connaissance, pouvant entraîner la mort si des soins ne sont pas prodigués rapidement[71].

III.7.Réduire les émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ proviennent essentiellement de la combustion d'énergie et la consommation représente la part la plus importante des gaz à effet de serre (GES). C'est donc le premier domaine d'intervention pour réduire les émissions de CO₂. En amont, les choix de production de l'électricité et la recherche pour capturer le dioxyde de carbone constituent un autre domaine d'intervention pour réduire ces émissions .

III.7.1.Réduire la consommation d'énergie

III.7.1.1.Dans le bâtiment

C'est l'un des secteurs qui a le plus grand potentiel de réduction grâce à :

- ✓ la limitation des situations de consommation d'énergie dans les différents usages (éclairage, chauffage, électroménager, climatisation...) ;
- ✓ une meilleure isolation des bâtiments anciens et neufs pour réduire le besoin de chauffage (murs, vitrages, toitures, matériaux...) ;

- ✓ le développement d'équipements décentralisés pour la production d'électricité, de chauffage et d'eau chaude utilisant :
- ✓ de nouvelles technologies, comme la pile à combustible ;
- ✓ des énergies renouvelables, comme le photovoltaïque, le chauffe-eau solaire, le chauffage au bois ... ;
- ✓ l'utilisation de technologies telles que le compteur intelligent, pour mesurer en temps réel la consommation, l'adapter en conséquence et contribuer ainsi à réduire la production globale d'électricité.

III.7.1.2. Dans les transports

Réduire les émissions de CO₂ dans ce secteur consiste à :

- ✓ développer les transports en commun, moins gourmands en pétrole que les voitures ;
- ✓ développer des voitures moins polluantes (moteur, climatisation, véhicules électriques et hybrides rechargeables...) ou avoir recours à des carburants moins émetteurs, comme le diesel ;
- ✓ modifier les comportements individuels (choix de transport, respect des limitations de vitesse, conduite au volant...).

III.7.1.3. Dans l'industrie

Les industries manufacturières et la construction représentent 17 % des émissions de CO₂. En France, grâce à l'amélioration des procédés et des technologies de production permet de produire autant en consommant moins d'énergie, les secteurs de l'industrie ont le plus contribué à la baisse des émissions entre 1990 et 2018 : industrie manufacturière (- 33 %), industrie de l'énergie (- 37 %).[72]

III.7.2. Choix énergétiques et recherche :

III.7.2.1. Réduire le contenu carbone de la production d'énergie

L'efficacité énergétique peut être améliorée au niveau des modes de production centralisés et dans les choix énergétiques des différents pays :

- ✓ en augmentant le rendement énergétique des installations et en limitant les pertes lors de la production, du transport et de la distribution, grâce à des technologies plus performantes. Par exemple le remplacement de vieilles centrales thermiques au charbon par des centrales à vapeur supercritique ou par des cycles combinés gaz, le développement de la production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération) ;
- ✓ en utilisant les énergies non émettrices de CO₂ comme moyen de production d'énergie :
- ✓ non renouvelables, comme le nucléaire ;
- ✓ renouvelables : hydraulique, éolien, solaire photovoltaïque, géothermie, biomasse, énergies marines.

III.7.2.2. Capter le CO₂ :

Limiter la déforestation et développer les puits de carbone

L'extension des forêts peut aussi avoir un impact important sur les émissions de gaz à effet de serre d'un pays. Grâce au mécanisme de la photosynthèse, les forêts fixent des quantités importantes de CO₂, constituant ainsi de véritables puits de carbone. En France, chaque année, c'est près de 70 millions de tonnes de CO₂ captées, soit 15 % d'émissions de gaz à effet de serre nationale.

III.7.2.3. Capturer et séquestrer le CO₂ :

En amont du processus de combustion ou en aval de celle-ci dans les fumées des moyens d'énergie centralisés, il s'agirait de capturer le CO₂ et de le stocker dans le sous-sol selon différentes techniques, totalement dédiées à cette fin ou dans le cadre d'une activité d'extraction, comme celle du pétrole ou du gaz naturel. Cette solution en est encore au stade de la recherche et les premières expérimentations ne font que commencer (aux Etats-Unis, au Canada, en Australie et en Europe).

Des recherches sur le captage et le stockage du CO₂ sont en cours d'expérimentation. En mai 2013, la centrale thermique du Havre a lancé la première phase de test de son démonstrateur de captage de CO₂. Grâce à un solvant aux amines,

cette technologie rend possible l'extraction du CO₂ contenu dans la fumée issue de la combustion du charbon. 1 tonne de CO₂ par heure pourrait ainsi être captée par ce dispositif. Ce test constitue une étape indispensable en vue d'un éventuel développement industriel de cette technologie[72].

III.8. Les procédés de captage

III.8.1. La capture CO₂ en postcombustion

Ce procédé consiste à intervenir en aval de l'étape de combustion et à traiter les gaz de combustion pour en extraire le CO₂. Les gaz de combustion contiennent majoritairement du N₂, provenant de l'air entrant, mais également du CO₂, de l'O₂, de l'eau, des NO_x et SO_x (oxydes d'azote et de soufre) et d'autres produits (combustion incomplète, espèces minoritaires de l'air entrant).

Le procédé le plus commun est la capture par un solvant présentant une affinité pour les molécules de CO₂ (c'est-à-dire capable de se lier avec des molécules de CO₂ dans certaines conditions, notamment de pression et de température). La capture se fait en deux temps :

- ✓ **charge du solvant** : les gaz de combustion sont mis en contact avec le solvant, qui se lie aux molécules de CO₂ ;
- ✓ **régénération** : le solvant est « régénéré » dans un autre compartiment pour libérer les molécules de CO₂ qui s'y étaient fixées.

Le reste du gaz de combustion, appauvri en CO₂, est libéré dans l'atmosphère. La réussite de la capture repose sur le choix du solvant et des procédés choisis pour la mise en contact. Les solvants aux amines, notamment la MEA (monoéthanolamine), sont les plus utilisés. D'autres solvants sont à l'étude visant à limiter notamment les coûts, l'énergie de régénération (énergie nécessaire pour effectuer le cycle charge-régénération) et les impacts socio-environnementaux[73].

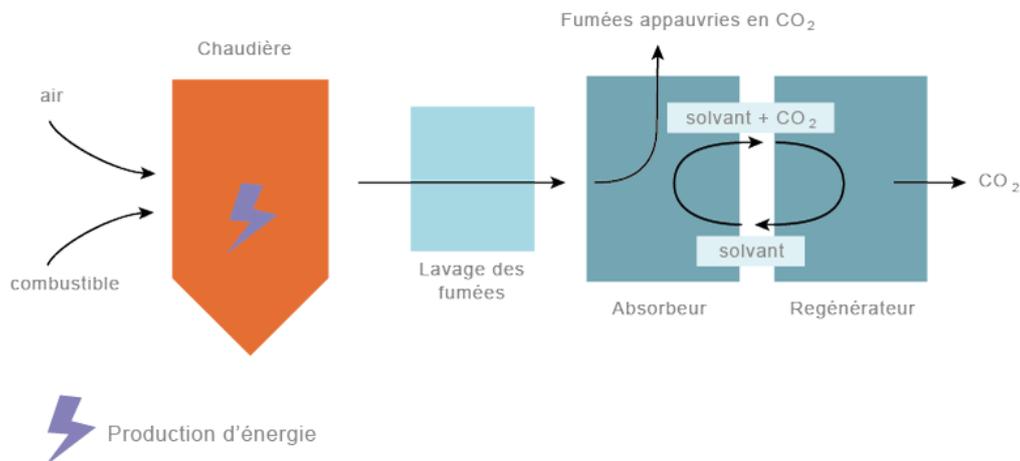


FIGURE III.4. La capture du CO₂ en Postcombustion[73].

III.8.2. La capture du CO₂ par oxycombustion :

L'oxycombustion est un procédé de combustion dans lequel le gaz comburant n'est plus de l'air mais de l'oxygène « pur » (pureté généralement supérieure à 95%). L'objectif est d'augmenter la teneur en CO₂ des fumées de combustion en éliminant le ballast d'azote, celles-ci contenant alors majoritairement du CO₂ et de l'eau.

Plus l'oxygène utilisé pour la combustion est pur, plus les fumées de combustion se rapprochent d'un mélange binaire H₂O/CO₂, la principale étape du captage de CO₂ consiste alors à condenser l'eau. Un autre avantage important est que le volume de fumées à traiter est nettement réduit et que les contaminants résiduels sont moins dilués qu'en postcombustion à l'air.

A noter que la combustion en boucle chimique (CLC) est également considérée comme une voie de captage du CO₂ de type oxycombustion. Dans le cadre du traitement thermique des déchets, la CLC peut être envisagée pour la combustion d'un gaz de gazéification produit à partir de déchets afin de générer des fumées principalement composées de CO₂ et d'eau[74].

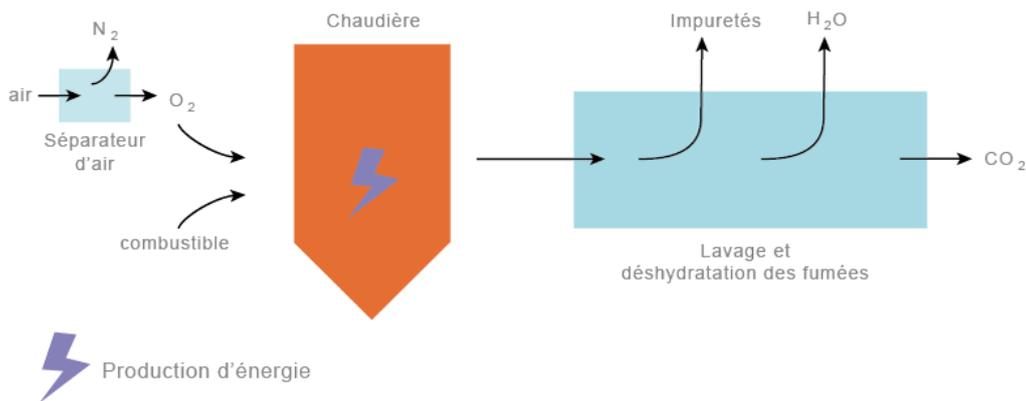


FIGURE III.5. La capture du CO₂ par oxycombustion[73].

III.8.3. La capture du CO₂ en précombustion :

Une autre voie de captage du CO₂ envisagée est la précombustion qui consiste à extraire le CO₂ à la source avant toute combustion (ou plus précisément oxydation complète). Dans ce cas il s'agirait de transformer les déchets solides en gaz de synthèse, puis en un mélange H₂/CO₂ et à en extraire le CO₂ afin de produire de l'hydrogène qui pourra être valorisé sous forme d'énergie (piles à combustibles, turbines à gaz) sans émettre de CO₂[74].

La technologie de capture en précombustion nécessite de modifier l'ensemble du procédé de combustion. Les principales étapes sont :

- ✓ gazéification du combustible, pour obtenir un mélange de CO + H₂O ;
- ✓ transformation chimique permettant d'obtenir un mélange CO₂ + H₂ ;
- ✓ extraction du CO₂ par solvant (typiquement du méthanol) ;
- ✓ production d'énergie grâce à l'hydrogène (turbines).

Cette technologie ne peut s'appliquer que sur des unités neuves.

Ces différents procédés permettent d'atteindre des taux de capture du CO₂ généralement de l'ordre de 80 à 95%. La capture en oxycombustion peut même permettre de dépasser 95%[73].

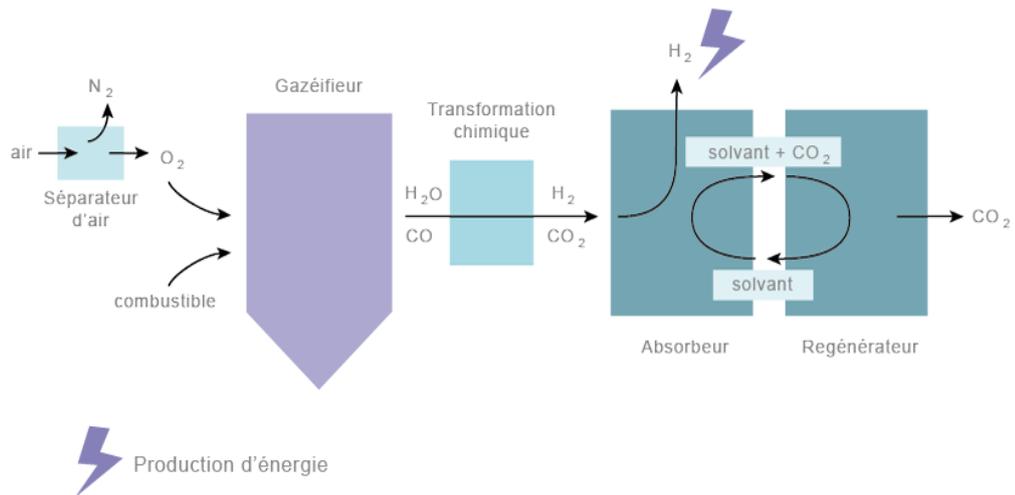


FIGURE III.6. La capture du CO₂ en précombustion[73].

III.9. Stockage du CO₂ :

Le stockage en grande quantité est réalisé en profondeur dans des formations géologiques. Les technologies de forage et d'injection sont déjà bien connues, et utilisées notamment pour l'extraction du pétrole. Il est cependant nécessaire de s'assurer de l'étanchéité du site de stockage. Les sites potentiels les plus courants sont les aquifères salins, les gisements épuisés de pétrole et de gaz et les veines de charbon non exploitées.

L'étanchéité est assurée par une ou plusieurs couches géologiques imperméables au CO₂ et un scellement des puits d'injection en fin d'exploitation. De nombreuses études portent encore sur l'impact des constituants du flux de CO₂ (CO₂ et espèces minoritaires) sur les roches constituant les cavités de stockage.

Pendant toutes les phases de stockage et les phases suivant la fermeture du site de stockage, un suivi est mis en place pour détecter toute fuite éventuelle et y remédier[73].

Conclusion général

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire constitue une contribution aux recherches consacrées à la décarbonation du gaz naturel. La complexité du procédé et les difficultés techniques des études expérimentales sur des configurations réelles, dans le domaine du raffinage et pétrochimie.

Le procédé de décarbonation du gaz naturel est l'un des procédés les plus importants dans la section d'épuration du gaz naturel car ce dernier doit être liquéfié et transporté.

Les éléments bibliographiques qu'ont montrés l'importance de la zéolithe comme catalyseur, adsorbants, échangeurs d'ions, Agents déshydratant.

Par rapport à cendres volantes non traitées, les zéolithes de cendres volantes présentent une capacité de sorption liée au dioxyde de carbone. La capacité de sorption du Te était la plus faible pour l'échantillon TS (0,24mmol/g), l'échantillon H a atteint une valeur de 1,2mmol/g, et la plus élevée pour la zéolithe à cendres volantes a été observée dans l'échantillon F avec une valeur de 4,16mmol/g. Les changements de la valeur se produisent en fonction de la méthode de synthèse et peuvent être associés à des paramètres texturaux comme la valeur S_{BET} (échantillon TS 34m²/g, échantillon H 39m²/g, échantillon F 414m²/g).

Des similitudes entre les matériaux synthétisés par fusion et les zéolithes commerciales peuvent être observées, prouvant que cette méthode de synthèse est très efficace. Les calculs de surface spécifique avec l'utilisation de deux gaz fournissent des informations sur le caractère microporeux de l'échantillon, indiquant que la sorption de l'azote à basse température peut être un facteur important. Que la sorption à basse température de l'azote peut être insuffisante pour comparer les échantillons. La distribution de la taille des pores prouve que la présence des micropores détermine l'efficacité du sorbant. Les essais volumétriques et thermogravimétriques indiquent qu'un échantillon synthétisé par fusion, suivi d'un échantillon synthétisé par hydrothermie présentent de très bonnes et de bonnes caractéristiques de capacité de sorption, les propriétés de sorption des échantillons synthétisés en deux étapes sont beaucoup plus faibles. Te raison est la présence de différents types de zéolithes dans les échantillons, le rapport Si/Al et le rendement de la zéolite présente dans l'échantillon. Les tests thermogravimétriques fournissent des informations sur les propriétés de régénération des échantillons analysés, concernant la pénalité

Conclusion générale

énergétique pour la régénération. Ces informations confirment également qu'un processus d'adsorption physique a lieu. La comparaison de la structure avec les résultats de sorption fournit la preuve d'une corrélation entre la quantité de cristaux et la capacité de sorption.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] :Saeid Mokhatab, William A. Poe, James G. Speight, handbook of natural gas transmission and processing, (2006).
- [2] :BEKKOUCHE YASSER &LEBBIHAITE ABDERRAOUF« Décarbonation du gaz naturel au niveau du champ d'ohanet » Université D'EL OUED 2014.
- [3] : Marcelo L. Mignoni, Diego I. Petkowicz ,Nádia R.C. Fernandes Machado b, Sibele B.C. Pergher, Synthesis of mordenite using kaolin as Si and Al source, Applied Clay Science 41 (2008) 99–104].
- [4] :MEZIANE FAHIM & ACHIOU SALIM « Étude de la capacité d'absorption des gaz acides au niveau de complexe de GL_2/Z » Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2008.
- [5] : HAMADECHE HASSIBA « Vérification du design du et étude de la philosophie de contrôle de la température de fuel gaz vers turbines » Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES2007 - 2008.
- [6] : Secrétariat de la CNUCED selon les données de BP Amoco.Statistical Review of World Energy 2007.
- [7]: mémoire : Technicien Supérieur en Industrie Pétrochimique. Spécialité : Raffinage du gaz. Email : lahak.sidahmed@gmail.com) présenté ;Lahak Sid ahmed.
- [8] : Chemistry of Petrochemical Processes
- [9] :HABLA ADEL & NOUINOUA « Calcul de Vérification et optimisation des paramètres de colonne de stabilisation de condensat du train (30) de l'usine de RHOARDS NOUSS phase A» Université M'HAMED BOUGARA- BOUMERDES Juin2007.
- [10] :ALEXANDER ROJEY & BERNARD DURAND : « Le gaz naturel» Edition technip « paris»- 1997
- [11] : ADRIEN BERNARD ISSN : 2269-787X .Techno-science.net titre clé abrégé :consulté le 2013-10-11.
- [12] : BENDALI AMOUR NESRIN &DJELLOUT SLIMANE <Impact du changement des caractéristiques de la charge du débutaniseur sur les paramètres opératoires université M'HAMED BOUGARA- BOUMERDES 2007

Références bibliographiques

[13] : Documents et rapports d'activités de gaz de France 2005.

[14]: key world energy statistics (2006) (AIE).

[15]: **Saeid Mokhtab, William A. Poe, James G. Speight**, handbook of natural gas transmission and processing, (2006).

[16] : **EFP. Training, Gaz naturel**, production, traitement et transport. Publication d. Edition Technique 2003 P : [23-47].

[17] : **IFP .Training, Gaz naturel**, production, traitement et transport .publication d. Edition technique 2003 page : [24-47].

[18] : **James G. Speight, Ph. D, D.Sc**, natural gas a basic handbook, university of Trinidad and Tobago, page 8, part I. (2007).

Références bibliographiques

- [19]: **David W. Hendricks**, water treatment unit processes: physical and chemical, (2006).
- [20]: **François Gaudin**, socioterminologie: une approche sociolinguistique de la terminologie, (2003)
- [21]: **Uri Tsoler**, **Handbook of detergents**, volume 121, 2009
- [22]: **Lesley E. Smart Elaine**, **A. Moore**, solid state chemistry, (2005).
- [23]: **Jan-Erik Otterstedt**, **Dale A. Brandreth**, small particles technology, (2005).
- [24]: **Sivasankar**, engineering chemistry, 2008
- [25]: **Marco Antonio Chaer Nascimento**, theoretical aspects of heterogeneous catalysis, 2001
- [26]: **Arthur W. Chester I Eric G. Derouane**, zeolite characterization and catalysis, (2009).
- [27]: **BENSADEK, SM**. Conception d'électrode modifiée à base de zéolithe/nickel, 14/12/2010.
- [28]: **Michael Mortimer**, **Peter Taylor**, chemical kinetics and mechanism, (2002)
- [29]: **Subhash Bhatia**, Zeolite catalysis: principles and applications, 1990.
- [30]: **Claude K. W. Friedli**, chimie générale pour ingénieur, (2002)
- [31]: **Michel Guisnet**, **Fernando Ramôa Ribeiro**, les zéolithes: un nano monde au service de la catalyse, (2006)
- [32]: **Nicholas D. Spencer**, **John H. Moore**, encyclopedia of chemical physics and physical chemistry, Volume 3, 2001.
- [33]: **Rosemarie Szostak**, molecular sieves: principles of synthesis and identification, 1997
- [34]: **Jha, B., Singh, D.N.**: A review on synthesis, characterization and industrial application of fly ash zeolites. J. Mater. Edu. 33(1-2), 65-132 (2011)
- [35]: **Scott, M.A., Kathleen, A.C., Dutta, P.K.**: Handbook of zeolite science and technology. CRC Press, New York (2003). ISBN 0-8247-4020-3
- [36]: **Par Rebecca L. Busby**, institute of gas technology, natural gas in nontechnical language, (1999).

Références bibliographiques

- [37]: **C. Baerlocher, L. B. McCusker**, <http://www.iza-structure.org/databases>.
- [38]: **C. Baerlocher, W. M. Meier, D. H. Olson**, *Atlas of Zeolite Framework Types*, 2007.
- [39]: **P. Payra and P. K. Dutta**, Handbook of zeolite science and technology, Marcel Dekker, 2003.
- [40]: **T. Maesen**, Studies in Surface Science and Catalysis 168, Elsevier, 2007, p: 3, 4
- [41] : **Christophe Roux-Dufort**, la gestion de crise, chapitre 4, 1999.
- [42] : **Nea**, Protection radiologique méthodes d'évaluation des conséquences Economiques, 2000.
- [43] : **Jeanne Mager Stellman**, encyclopédie de sécurité et de santé au travail, volume 2, 2000.
- [44]: **David W. Hendricks**, water treatment unit processes physical and chemical, 2006.
- [45]: **Jens Weitkamp, Lothar Puppe**, catalysis and zeolites: fundamentals and Applications, 1999.
- [46]: **R. T. Yang**, gas separation by adsorption processes, 1997.
- [47]: **James H. Clark, Christopher N. Rhodes**, clean synthesis using porous inorganic Solid catalysts and supported reagents, chapitre 2, 2000.
- [48]: **Egon Wiberg, Nils Wiberg, Arnold Frederick Holleman**, inorganic chemistry, 2001.
- [49]: **Gwen Pilling**, Salters higher chemistry, 1999.
- [50]: **George Burton**, chemical storylines, 2000.
- [51]: **J. Weitkamp and M. Hunger**, Studies in Surface Science and Catalysis 168, Elsevier, 2007, p: 788.
- [52]: **J. H. C. van Booff' and J.W. Roelofsen**, Studies in Surface Science and Catalysis 58, Elsevier, 1991, p: 263, 268.

Références bibliographiques

[53] : **C. Bernardon**, 2016, LES ZEOLITHES COMME CATALYSEURS « VERTS » POUR LA SYNTHÈSE ORGANIQUE : de leur synthèse à façon à leurs applications en chimie organique, Docteur de l'université de Strasbourg, p : 280.

[54] : **M. C. Nourrdine**, 2011, thèse de magister, Élimination des polluants organiques par des zéolithes modifiées, p : 92.

[55] : **Jean-Baptiste, P., Ducroux, R.** Potentiel des méthodes de séparation et stockage du CO₂ dans la lutte contre l'effet de serre .s.l. C. R. Geoscience, 2003, Vol. 335, p.611-625.

[56]: Actu Environnement (https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dioxyde_de_carbone_co2.php4):05/06/2019.

[57] : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-dioxyde-carbone-729/,2001-2021>

[58] : **COPIGNEAUX. Distillation.** Absorption colonnes garnies, Techniques de l'ingénieur, traité génie des procédés : 10/03/1993

[59] : **S. BUCH**, L'organe d'operating conjoint relatif au développement d'ohanet, Algérie SONATRACH-BHP BILLITON : 11/03/2009, page 124-137.

[60] : **Med barahhou. I .douadi** Estimation et comparaison des émissions de CO₂ dans les deux complexe. GL2/Z ET GL3/Z. à 2013.11%

[61] : **Neli A. Campbell et Jane B. Reece, Biologie, Erpi**, 2007, 1400 p.

[62] : **Carboglace est une marque déposée en France par Air liquide** ,2018.

[63]: **von Baczko, K**, éd., Gmelins Handbouch der Anorganischen Chemie : Kohlenstoff, 8^e_éd., Chemie GMBH, Weinheim/Bergstr., 1970, part C. Section 1,p. 413-416.

[64] : **Philips, R ? J., Davis, B. J., Tanaka, K. L, Byne, S., Mellon, M. T ? Putzig, N.E. ? ...& Smith, I. B.** (2011) [Massive CO₂ ice deposits sequestered in the South polar layered deposits of Mars \[archive\]](#). Science, 332(6013), 838-841.

Références bibliographiques

[65]: **Le Quéré, C. et al. (2013).** The global carbon budget 1959-2011. [Le bilan mondial du carbone 1959-2011.]

[66] : **Quel est VOTRE Impact** (<https://votreimpact.org/gaz-a-effet-de-serre/sources-de-co2>).

[67]: **IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007**, Intergovernmental Panel on Climate Change. [GIEC Quatrième Rapport d'Évaluation: Changement Climatique 2007, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

[68] : **Camellia mateichihbeu.** Préparation et caractéristique de couche mince d'oxyde de métallique semi-conducteur pour la détection du gaz polluant atmosphérique
.lasc :19/11/2007.

[69] : **GES / quels sont les effets des gaz à effet serre sur | ... - GEO**
(<https://www.geo.fr/environnement/ges-quels-sont-les-effets-des-gaz-a-effet-de-serre-sur-lenvironnement-193401>),2018.

[70] : **Dioxyde de carbone (CO₂) – Respire** (<https://www.respire-asso.org/dioxyde-de-carboneco2/#:~:text=Au%2Ddel%C3%A0%2C%20les%20effets%20sur,des%20tremblements%20et%20des%20sueurs.>),21/06/2004.

[71] : **Dangers Physiologiques du Dioxyde de Carbone** – AFGC.

[72] : **Réduire les émissions de CO₂ : les solution | EDF France** (<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/reduire-les-emissions-de-co2-les-solutions>),2021.

[73] : **Capture et stockage du CO₂ : fonctionnement, filières, enjeux...**(
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/capture-et-stockage-du-co2-csc>),2011-2021.

[74] : **RECORD** : les procédés de capture du CO₂. Cas des unités de traitement et de valorisation thermique des déchets. Etat de l'art, 2013, 118 p, n°11-0236/1A.

[75]: **AGH University of Science and Technology**, Faculty of Energy and Fuels, al. A. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków,Poland.

Références bibliographiques

- [76]: **Madden, D. & Curtin, T.** Carbon dioxide capture with amino-functionalised zeolite- β : A temperature programmed desorption study under dry and humid conditions. *Mesoporous Mater.* **228**, [310–317] (2016).
- [77]: **Cheng-hsiu, Y., Chih-hung, H. & Chung-sung, T.** A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol Air Qual. Res.* **12**, [745–769] (2012).
- [78]: **Recent Developments in Metal-Organic Frameworks and Implications** for Carbon Capture, <https://jclfss.weebly.com/design-andcost.html>.
- [79]: **Wang, Q., Luo, J., Zhong, Z. & Borgna, A.** CO₂ capture by solid adsorbents and their applications : current status and new trends. *Energy Environ. Sci.* **4**, 42–55 (2011).
- [80]: **Wdowin, M., Franus, M., Panek, R., Badura, L. & Franus, W.** The conversion technology of fly ash into zeolites. *Clean Technol. Environ. Policy* **16**, 1217–1223 (2014).
- [81]: **Kalvachev, Y., Zgureva, D., Boycheva, S., Barbov, B. & Petrova, N.** Synthesis of carbon dioxide adsorbents by zeolitization of fly ash. *J. Therm. Anal. Calorim.* **124**, 101–106 (2016).
- [82]: **Holler, H. & Wirsching, U.** Zeolites formation from fly ash. *Fortschr Miner.* **63**, 21–43 (1985).
- [83]: **Franus, W. & Wdowin, M.** Wykorzystanie popiołów lotnych klasy F do produkcji materiału zeolitowego na skalę półtechniczną. *Polityka Energ.* **14**, 79–91 (2011).
- [84]: **Ruen-ngam, D., Rungsuk, D., Apiratikul, R., Ruen-ngam, D. & Rungsuk, D.** Zeolite Formation from Coal Fly Ash and Its Adsorption Potential. *J. Air Waste Manage. Assoc.* **59**, 1140–1147 (2015).
- [85]: **Achilles, M. C. N., Morris, R. V., Chipera, S. J., Ming, D. W. & Rampe, E. B.** X-ray diffraction reference intensity ratios of amorphous and poorly crystalline phases: implications for chemin on the Mars Science Laboratory mission. In *Lunar and Planetary Science Conference; 18–22 Mar. 2013 Lunar and Planetary Science Conference* (2013).

Résumé

Le procédé de décarbonatation est très important dans le traitement du gaz naturel. Puisque la présence du CO₂ dans le gaz naturel provoque plusieurs problèmes tels que la corrosion des équipements ainsi que le CO₂ se comporte comme diluant, réduisant la valeur énergétique du gaz tout en augmentant le coût de transport.

نزع ثاني أكسيد الكربون مهم جدا معالجة الغاز الطبيعي لان وجوده يسبب عدة مشاكل منها تآكل التجهيزات و من جهة أخرى ثاني أكسيد الكربون له خاصية التخفيف التي تخفض من القيمة الطاقوية للغاز وبالتالي يؤدي الى ارتفاع تكلفة النقل.

Abstract

The decarbonation is very important process in the treatment of natural gas

Because presence of CO₂ in natural gas causes several problems such as equipment corrosion as well as CO₂ acts as a diluent , reducing the energy value of the gas while increasing the cost of transport .