

Le stockage géologique du CO₂

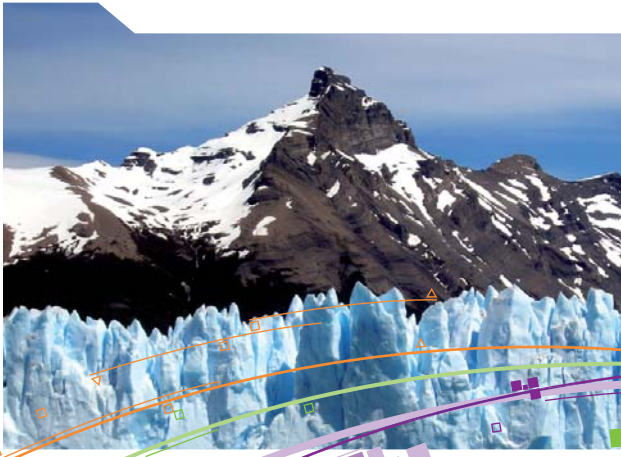
Les solutions IFP Energies nouvelles pour un déploiement sécurisé

IFP Energies nouvelles est un organisme public de recherche, d'innovation industrielle et de formation intervenant dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. Sa mission est d'apporter aux acteurs publics et à l'industrie des technologies performantes, économiques, propres et durables pour relever les défis sociétaux liés au changement climatique, à la diversification énergétique et à la gestion des ressources en eau. Son expertise est internationalement reconnue.

■■ Capter et stocker le CO₂ pour lutter contre l'effet de serre

La lutte contre le réchauffement climatique, en grande partie dû aux émissions de CO₂ liées à l'utilisation de l'énergie, est désormais un enjeu planétaire considérable. IFP Energies nouvelles, pour qui les problématiques environnementales ont toujours constitué une préoccupation majeure transverse à l'ensemble de ses recherches, a fait de ce défi l'une de ses priorités absolues.

Au-delà de l'effort de réduction des émissions de CO₂, il est indispensable de capter le CO₂ partout où cela est possible, c'est-à-dire principalement sur les sites industriels. IFP Energies nouvelles est, depuis plusieurs années déjà, fortement engagé dans le développement des technologies nouvelles — captage, transport et stockage dans le sous-sol — qui permettront de limiter les rejets de CO₂ dans l'air. Il dispose d'atouts importants en la matière dans la mesure où les compétences nécessaires pour conduire ces recherches sont celles mises en œuvre dans le cadre de l'exploitation pétrolière. IFP Energies nouvelles est aujourd'hui un chef de file important dans ce domaine, tant au niveau européen que national.



Les enjeux du stockage du CO₂

La nécessité de réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), et en premier lieu de CO₂, s'impose progressivement à l'échelle internationale. Il s'agit de lutter contre le réchauffement climatique d'origine anthropique, qui résulte en particulier de l'utilisation intensive des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) depuis les débuts de l'ère industrielle.

Le captage et stockage du CO₂ (CSC) pourrait, selon l'AIE, contribuer à hauteur de 19 % à la réduction globale des émissions de GES au niveau mondial, soit environ 5 Gt de CO₂ par an en 2050. Il est l'une des solutions qui permettra de renforcer les actions à développer par ailleurs pour améliorer l'efficacité énergétique et la décarbonation progressive de l'énergie, notamment en utilisant des ressources et des vecteurs énergétiques alternatifs (solaire, éolien ou hydrogène par exemple).

3

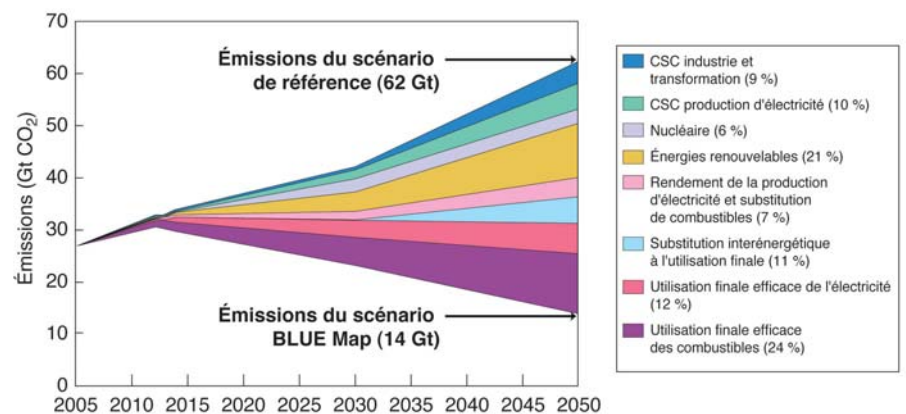
Le CSC consiste à capter le CO₂ émis par les installations industrielles (principalement les centrales électriques, mais également les cimenteries, les aciéries, etc.) pour ensuite le stocker dans le sous-sol.

Différentes zones géologiques sont envisagées pour stocker le CO₂ :

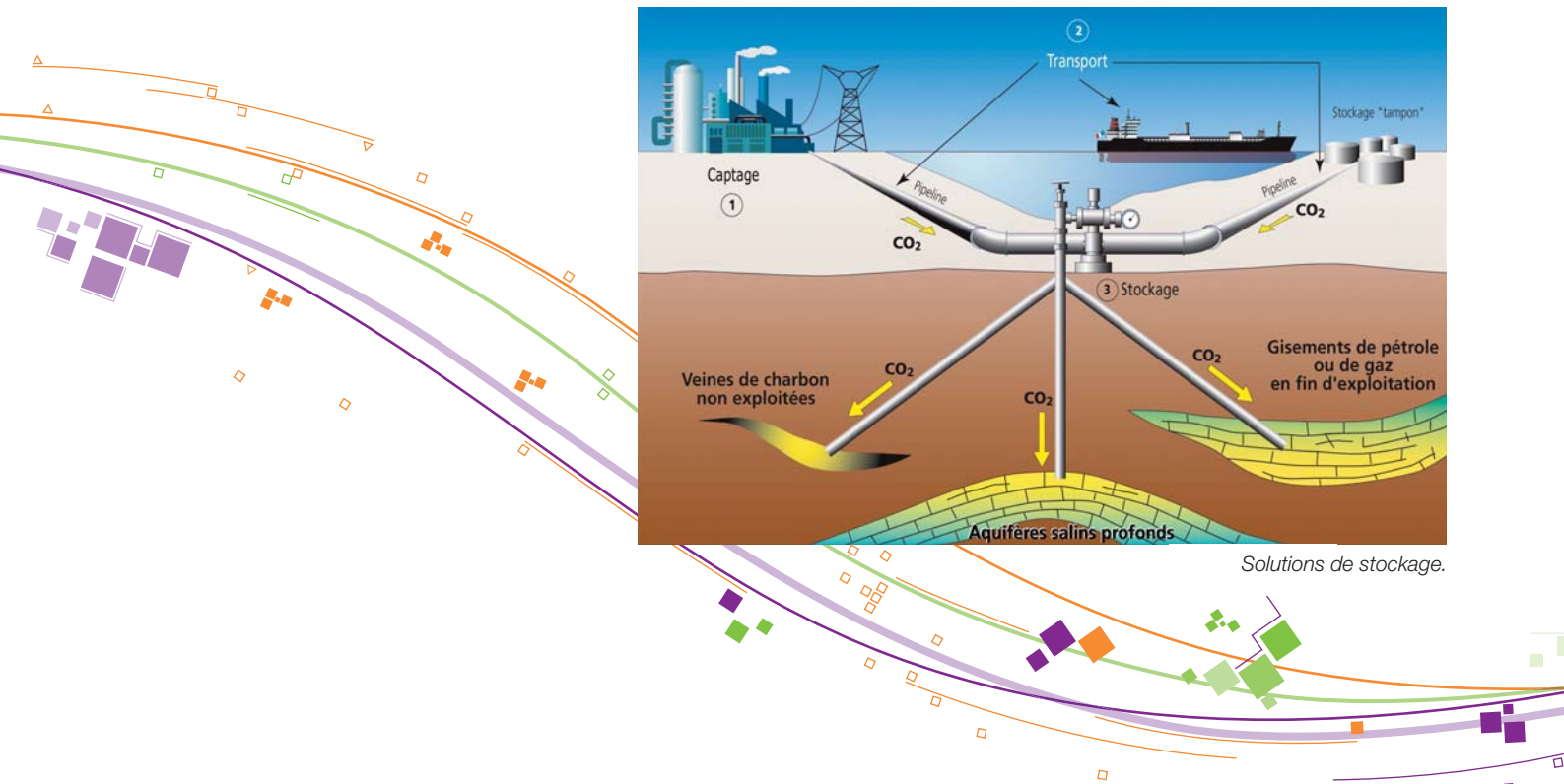
- les aquifères salins profonds,
- les réservoirs d'hydrocarbures des champs matures :
 - soit après exploitation dans les réservoirs déplétés,
 - soit en cours de production avec le bénéfice additionnel d'aider à drainer les hydrocarbures hors des réservoirs (procédés EOR/EGR),
- les veines de charbon non exploitables,
- un stockage sous forme minérale dans les roches ultrabasiqes.

Seuls les champs matures ou les aquifères salins permettront de stocker des quantités suffisantes à l'échelle du problème posé. On estime ainsi le potentiel de stockage de CO₂ des champs matures à environ 900 Gt, mais leur répartition mondiale est très inégale sur la planète. Les aquifères salins ont

une plus grande couverture géographique, mais du fait de leur manque d'intérêt économique à ce jour, ils sont peu étudiés et donc encore mal connus. Leur potentiel de stockage de CO₂ reste incertain, mais jugé largement supérieur à celui des champs matures.



Le captage et stockage du CO₂ (CSC) pourrait contribuer à hauteur de 19 % à la réduction globale des émissions de GES au niveau mondial, soit environ 5 Gt de CO₂ par an en 2050. Source : AIE.



Solutions de stockage.

4

Le développement d'une filière industrielle du CSC comporte de multiples défis technologiques :

- le principal concerne le captage et la réduction des coûts, actuellement de l'ordre de 60 à 80 €/t de CO₂ capté,
- au niveau du transport, il s'agit de mettre en place une infrastructure adaptée (réseau de conduites par exemple) et de prendre en compte l'impact d'autres gaz (oxygène, azote, etc.) ou des impuretés d'origines variées (NO_x, SO_x) que peut contenir le CO₂,
- le stockage géologique du CO₂ est sans conteste le segment de la chaîne CSC qui focalisera l'acceptation par la société de l'ensemble de la filière. Il devra être maîtrisé tant sur le court terme (les quelques décennies d'injection et de surveillance du stockage) qu'à plus longue échéance (plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années) de façon à en assurer la pérennité.

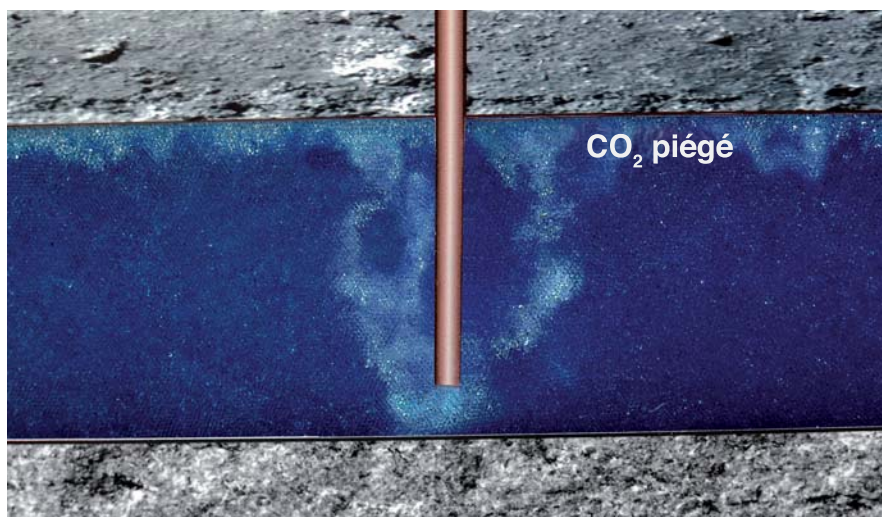
Le stockage du CO₂ fait appel à des technologies éprouvées depuis des décennies dans l'industrie pétrolière.

Cependant, si les champs pétroliers ont prouvé leur capacité à contenir des fluides pendant des millions d'années, il reste à démontrer qu'ils ne réagiront pas négativement à l'injection de CO₂. Ce gaz, dissous dans l'eau, constitue en effet un acide faible qui peut affecter la minéralogie et la structure de la roche, et entraîner une éventuelle modification non seulement de ses propriétés mécaniques, mais aussi pétrophysiques. En ce qui concerne les aquifères salins, les défis sont encore plus nombreux puisqu'il s'agit de couches géologiques mal connues. De nombreux travaux sont nécessaires

pour identifier les zones qui pourront contenir les quantités voulues de CO₂ sur des échelles de temps de plusieurs centaines d'années.

Fort de son expertise acquise dans le domaine de l'exploitation des réserves pétrolières et gazières, IFP Energies nouvelles occupe une place privilégiée pour développer les technologies nécessaires à une mise en œuvre sûre du stockage géologique du CO₂. Son principal objectif est de mettre au point des logiciels industriels permettant la modélisation et le monitoring des stockages, ainsi que l'optimisation du procédé d'injection et de stockage.

Le CO₂ injecté dans un aquifère remonte en panache à travers le réservoir jusque sous la roche couverture, où il est piégé.



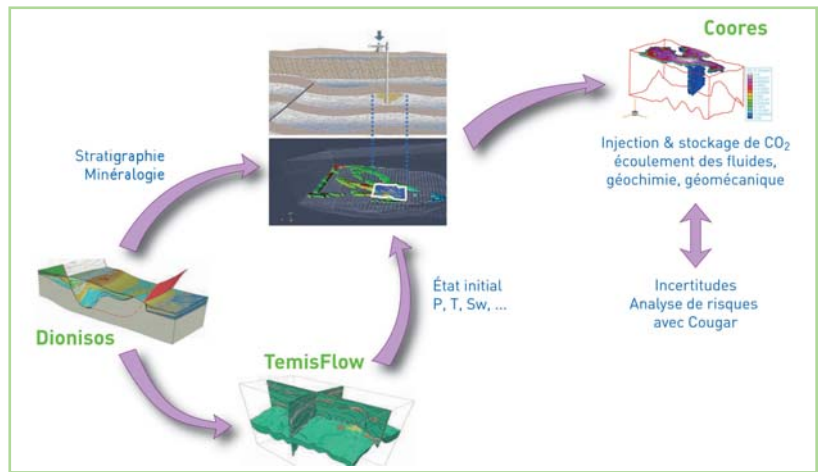
Les étapes de la vie du stockage

Sélection des sites de stockage et évaluation des risques (phase préopération - 3 à 5 ans)

IFP Energies nouvelles développe un workflow (schéma de processus métier) de modélisation multiéchelle, du bassin au proche puits d'injection, complété par une analyse de risques dont la mise en œuvre est indispensable au succès de la phase de sélection d'un site.

Il comprend :

- une précontrainte régionale à l'aide d'une modélisation de bassin (fluides et pression avec TemisFlow™, dépôts sédimentaires avec Dionisos™),
- une modélisation millénaire de l'évolution d'un panache de CO₂ avec le logiciel Coores™, qui permet de simuler les différents types de stockage envisagés et leur évolution sur de longues périodes.



Stockage du CO₂ : du modèle stratigraphique au processus d'injection.

Il modélise les écoulements réactifs de plusieurs fluides, les modifications pétrophysiques liées aux réactions chimiques et, par un couplage avec un logiciel de géomécanique, les impacts dus à l'augmentation de la pression et aux changements des propriétés mécaniques sur les éléments constitutifs et environnants du stockage : puits, couvertures et failles,

- une analyse fine des interactions fluides/roche, de l'échelle de l'échantillon à celle du champ,
- une prise en compte des incertitudes à toutes ces échelles (logiciel Cougar™).

La maîtrise des risques de fuite nécessite également le contrôle de l'étanchéité des failles et des couvertures : IFP Energies nouvelles étudie dans ce cadre les lois de propagation de fractures dans les argilites et le comportement mécanique des failles.

L'application de ce workflow complet doit permettre de sélectionner des sites de stockage qui répondront aux critères mis en place par les autorités compétentes, et d'optimiser ainsi l'évaluation des quantités injectables.

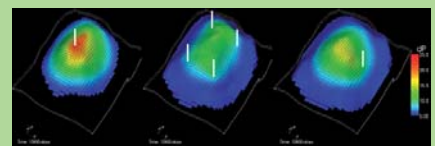
Coors™

Mis au point par IFP Energies nouvelles, le logiciel Coors™ est destiné à évaluer les effets à long terme du stockage du CO₂ sur un site géologique. Après plusieurs années de développement, Coors™ est devenu un outil de référence utilisé dans différents projets, y compris en collaboration avec des partenaires européens. Les laboratoires de recherche d'IFP Energies nouvelles sont mis à forte contribution pour construire les modèles de données géochimiques nécessaires à la modélisation des écoulements réactifs, pour étudier les effets du CO₂ sur la résistance mécanique des roches, et pour valider Coors™ sur des expériences à partir d'échantillons de roche.

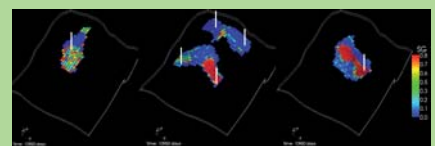
Au sein du programme européen Dynamis (2006-2009), qui a étudié la

faisabilité d'une centrale thermique couplée avec un système de captage et de stockage du CO₂, les scientifiques d'IFP Energies nouvelles ont ainsi fait appel à Coors™ pour simuler l'injection du CO₂ sur une période de 30 ans. Trois structures géologiques différentes ont servi de cadre à ces modélisations, deux aquifères et un ancien gisement pétrolier situés au large des côtes anglaises et danoises. Grâce au logiciel, le comportement du CO₂ injecté dans les sites a pu être prédit, permettant d'assurer et d'optimiser son piégeage sur une période de 1 000 ans. L'influence du nombre de puits et de leur positionnement sur l'augmentation de la pression lors de l'injection ont, par exemple, pu être simulés avec Coors™ dans différents scénarios. Ces travaux ont notamment montré que le positionnement d'un

seul puits en flanc de structure permet de réduire l'augmentation de pression et donc de préserver l'intégrité de la couverture, tout en optimisant les coûts.



Modélisation avec Coors™ de l'évolution de la saturation en CO₂ après 30 ans d'injection. À gauche un puits en haut de la structure, au centre quatre puits autour du sommet, et à droite un puits sur le flanc de la structure.



Modélisation avec Coors™ de l'évolution de la surpression dans les mêmes conditions.

Construction et injection (phase opération - 10 à 50 ans)

De multiples données additionnelles sont récoltées dans les puits lors de la phase opérationnelle d'injection. Les mesures recueillies sont utilisées pour améliorer la caractérisation des réservoirs et des couvertures et mettre à jour les modèles, et ainsi optimiser l'injection en réduisant les risques. La mise en œuvre d'une palette de technologies de monitoring adaptées à chaque site permet de contrôler l'injection, l'intégrité des couvertures et des puits, et de suivre l'évolution du panache. Elle permet également d'effectuer un bilan massique du CO₂, de manière à certifier que les quantités injectées ont bien été piégées et peuvent ainsi éventuellement faire l'objet d'allocation de quotas.

IFP Energies nouvelles mène des études expérimentales en laboratoire afin d'estimer l'injectivité des

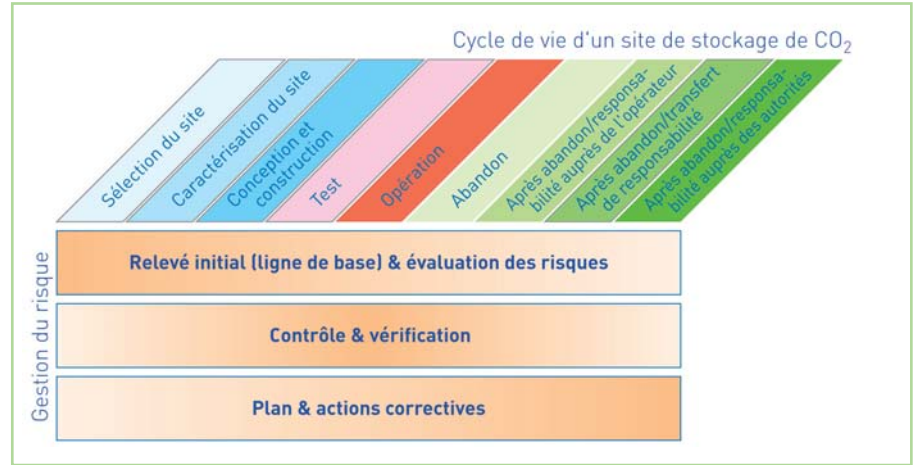


Schéma de processus métier du stockage.

réservoirs et la résistance des couvertures et des ciments qui en assureront l'étanchéité. Parmi les recherches en cours, des tests sur l'altération, en présence de CO₂, des ciments Portland utilisés classiquement dans l'industrie, ont permis d'étudier les effets de dissolution et de carbonatation qui peuvent conduire à leur altération mécanique.

Ils ont montré l'importance de maîtriser la tenue des interfaces ciment/métaux. En parallèle, IFP Energies nouvelles a développé et breveté des formulations de nouveaux ciments mieux adaptés au besoin de tenue à très long terme.

6



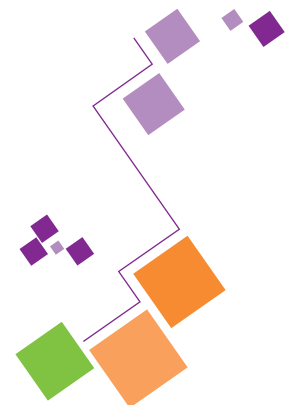
Dissolution et carbonatation en présence de CO₂, mesurées en laboratoire sur un échantillon de ciment.

Réinjecter du CO₂ dans un champ de gaz naturel : le pilote d'In Salah

Exploité par une *joint venture* réunissant BP, la Sonatrach et Statoil, le complexe de champs gaziers d'In Salah compte depuis 2005 deux puits d'injection



dans la région de Krechba (Algérie). Utilisé pour injecter du CO₂ dans un aquifère à 1 800 m de fond, afin de maintenir le réservoir de gaz naturel sous pression, In Salah joue le rôle d'un véritable laboratoire souterrain : en interprétant les campagnes de mesures sismiques et gravimétriques menées sur place, les chercheurs d'IFP Energies nouvelles peuvent produire des modèles rendant compte, par exemple, de la manière dont le CO₂ se met en place lors de la phase d'injection dans l'environnement souterrain.



Chambre à flux utilisée pour établir une ligne de base géochimique en phase de préinjection.



Surveillance du stockage (phase postopération - 1 000 ans)

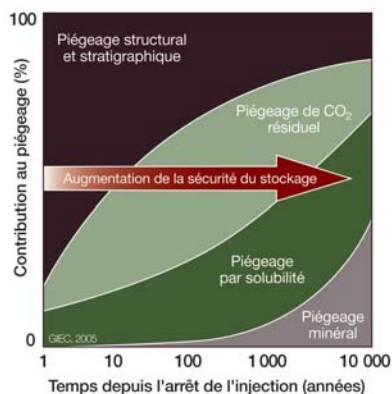
Après l'arrêt des opérations d'injection, l'opérateur doit pouvoir prouver aux autorités de contrôle, qui prendront la responsabilité du site, que le stockage est dans un état stable pour le futur. C'est à cette fin qu'un monitoring environnemental atmosphérique et des aquifères sera maintenu. En raison de la cinétique des phénomènes de dissolution et de minéralisation du CO₂, les risques de fuites sont de plus en plus faibles avec le temps.

IFP Energies nouvelles développe des méthodologies de suivi des sites utilisant en particulier des technologies sismiques, microsismiques, électriques, électromagnétiques, gravimétriques et géochimiques, et des mesures de déformations de surface.

■ En monitoring géochimique, IFP Energies nouvelles s'appuie sur l'analyse des gaz rares en tant que traceurs, qui permettent d'affirmer que le CO₂ identifié a pour origine, ou non, le réservoir de stockage. La comparaison de mesures répétitives effectuées par rapport à une ligne de base enregistrée en phase de préinjection permet de distinguer une éventuelle fuite du CO₂ issu du stockage, grâce à l'étude du bruit de fond naturel.

■ IFP Energies nouvelles met également au point des techniques de surveillance par écoute sismique à l'aide de capteurs permanents installés dans les puits d'injection ; en particulier le système d'écoute permanente SeisMovie™ développé avec CGGVeritas et GDF Suez, et commercialisé par CGGVeritas. IFP Energies nouvelles poursuit en parallèle le développement du logiciel μsics™, dont l'objet est la localisation des événements microsismiques.

Par ailleurs, IFP Energies nouvelles développe des méthodologies de remise à jour des modèles grâce aux données issues du monitoring pour améliorer les prédictions de ces modèles. Le risque zéro n'existant pas, il faudra prévoir des interventions de remédiation au cas où le monitoring indiquerait des mouvements de CO₂ hors du réservoir. Sur ce sujet, IFP Energies nouvelles étudie des solutions novatrices telle que l'ajout d'éléments colmatants au flux de CO₂ injecté.



Sleipner

Installé en mer du Nord dans les eaux territoriales norvégiennes, le pilote de Sleipner est "la" référence en matière de stockage géologique de CO₂. Ici, la compagnie Statoil a déjà injecté, depuis 1996, 11 Mt de CO₂ issu d'un gisement de gaz naturel, dans un aquifère situé à 800 m sous le plancher océanique.

Les chercheurs d'IFP Energies nouvelles et leurs partenaires européens réalisent depuis 2008 plusieurs études sur le site. L'une d'elles leur permet de vérifier que le CO₂ reste confiné dans la structure de stockage, sous la couverture principale. Ils ont également élaboré, grâce à des données issues de deux campagnes sismiques menées par Statoil en 1994 et en 2006, des vues montrant, pour la première fois en 3D, la répartition du CO₂ à l'intérieur de la structure géologique. Cette étape est indispensable avant l'élaboration d'un modèle scénarisant l'évolution du CO₂ dans un milieu naturellement complexe sur le plan géologique.

IFP Energies nouvelles, fédérateur de la R&D dans le domaine du stockage du CO₂



8

Tête de puits utilisée pour l'injection de CO₂ : le pilote de Total permet de tester dans le bassin de Lacq un projet intégré de captage et de stockage géologique du CO₂.

Un acteur français

IFP Energies nouvelles est impliqué dans un certain nombre de projets en cours de montage sur le territoire français. Le projet à Lacq dirigé par Total consiste en une unité d'injection pilote dans le champ dépleted de Rousse dans le sud de la France.

Le projet France Nord, soutenu par l'Ademe, et qui regroupe six grands groupes industriels français et cinq organismes européens de recherche (dont trois français), vise à sélectionner un site géologique approprié pour le stockage de CO₂ en aquifères salins profonds dans le bassin de Paris.

Un acteur européen

Depuis les années 2000 et tout au long de la montée en puissance des efforts de R&D dans le domaine du CSC, IFP Energies nouvelles s'est positionné comme un expert de référence en participant à la plupart

des initiatives de recherche européennes, souvent en tant que leader (projets Castor, Coach, InCA-CO₂, etc.).

Ainsi le projet européen Castor, piloté par IFP Energies nouvelles, qui visait à proposer des technologies permettant

Projet ANR SOCECO₂

Dans le cadre du projet ANR SOCECO₂, IFP Energies nouvelles a réalisé une étude sur le potentiel et les scénarios de déploiement des solutions de captage/stockage du CO₂ en France sur la période 2020-2050. L'évaluation technico-économique et environnementale de la filière CSC, menée au sein du projet, vise à tester l'adéquation entre le potentiel de captage des grands émetteurs nationaux de CO₂ et les capacités des sites de stockage disponibles à ce jour. Plusieurs scénarios sont envisagés qui prennent en compte les contraintes liées au transport, à la nature des sites (onshore ou offshore) et à l'acceptation des technologies par les populations

concernées. L'étude privilégie un scénario qui prévoit le stockage des émissions de la région PACA dans des réservoirs souterrains situés en mer Méditerranée, et le stockage des émissions des régions Lorraine, Île-de-France, Nord-Pas-de-Calais et Haute-Normandie dans l'aquifère du Bassin parisien, si la population l'accepte. Dans le cas contraire, le stockage est prévu soit dans des champs pétroliers dépleteds, soit dans des aquifères souterrains en mer du Nord. Le projet SOCECO₂ a réuni, aux côtés d'IFP Energies nouvelles, les plus grands acteurs nationaux de la filière CSC dont Alstom, Apesa, le BRGM, le Cired, GDF Suez, l'Ineris et Total.



Le transport du CO₂ par bateau est plus rentable qu'une conduite offshore pour des trajets dépassant 500 km et qu'une conduite onshore pour des distances supérieures à 1 000 km.

le captage et le stockage de 10 % du CO₂ émis en Europe, s'est achevé en 2008. Il figure parmi les six *success stories* du 6^e PCRD sélectionnées par la Commission européenne.

Par ailleurs, IFP Energies nouvelles s'est fortement impliqué dans les projets européens de stockage Ecco et GeoCapacity. Il est également partie prenante au projet CO₂ReMove,



Le pilote industriel installé en 2006 dans le cadre du projet Castor sur la centrale de Dong Energy à Esbjerg (Danemark) est une première mondiale.

destiné à prédire l'évolution d'un site de stockage de CO₂.

Enfin, IFP Energies nouvelles s'engage dans trois nouveaux projets européens : CO₂Care, CGS Europe et SiteChar. Ce dernier projet, qui est coordonné par IFP Energies nouvelles, devra fournir des éléments clés sur la caractérisation de sites potentiels dans la perspective du déploiement industriel du CSC.

Un acteur international

IFP Energies nouvelles est également très présent au niveau des réseaux d'actions internationaux liés au CO₂ ; il assure par exemple la vice-présidence de la plate-forme technologique européenne ZEP (Zero Emission Fossil Fuel Power Plants).

En raison de son expérience et de ses compétences dans le domaine du CSC, IFP Energies nouvelles est de plus en plus sollicité pour apporter son savoir-faire lors de la mise en place d'infrastructures et de projets pilotes à travers le monde.

Bahia

Le bassin du Recôncavo compte parmi les régions productrices d'hydrocarbures les plus importantes du Brésil. Après 50 ans d'exploitation, la compagnie nationale Petrobras est amenée à recourir à la technique de récupération assistée du pétrole par injection de CO₂. Or, ce dispositif intéresse la recherche dans le domaine du CSC, car il représente un laboratoire pour comprendre le comportement à moyen terme du CO₂ stocké dans le sous-sol. Le programme Bahia, qui a associé IFP Energies nouvelles à Petrobras entre 2007 et 2009, a permis de mieux comprendre quel effet a eu, sur le site, l'injection durant 18 ans de 600 000 t de CO₂. Au sein du projet, IFP Energies nouvelles a évalué, sur la base d'échantillons provenant de différents forages, l'évolution dans le temps de l'état des roches souterraines et vérifié si les gaz contenus dans ces échantillons provenaient de la surface ou étaient remontés depuis le sous-sol. Par ailleurs, grâce aux informations fournies par Petrobras, IFP Energies nouvelles a pu identifier, dans les données géophysiques, les éléments montrant la répartition du CO₂ dans le gisement. Des simulations ont été réalisées à partir du logiciel Coores™, indiquant la manière précise dont ce gaz y a évolué au cours du temps.



2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
SACS2 / CO ₂ STORE													
	Stockage CO ₂												
		PICORE											
	NGCAS												
			CO ₂ NET										
			CASTOR										
			InCA-CO ₂										
			CO ₂ GeoNet										
			DYNAMIS (1 ^{re} phase Hypogen)										
			EU GeoCapacity										
			CO ₂ ReMoVe										
			Géocarbone Monitoring										
			Géocarbone Injectivité										
			Géocarbone Intégrité										
			Géocarbone Carbonatation										
			Géocarbone Picoref										
			COACH										
			Hétérogénéités - CO ₂										
			Puits CO ₂										
			SOCECO ₂										
			COSMOS 2										
			SHPCO ₂										
			PROCHE-PUITS										
			SENTINELLE										
			EMSAP CO ₂										
			ECCO										
			Lacq										
			Bahia										
			Carbosulcis										
			COCATE										
			CGS Europe										
			SiteChar										
			CO ₂ CARE										
			France Nord										
			Porto Tolle										

IFP Energies nouvelles se positionne en leader des projets de recherche nationaux et européens dans le domaine du stockage du CO₂. Son expertise reconnue lui permet de développer rapidement des collaborations avec les industriels à l'échelle internationale.

- Projet de recherche européen coordonné par IFP Energies nouvelles
- Projet de recherche ANR coordonné par IFP Energies nouvelles
- Projet de recherche collaboratif
- Projet de recherche européen auquel IFP Energies nouvelles participe
- Projet de recherche ANR (ou FUI) auquel IFP Energies nouvelles participe
- Projet de recherche RTPG coordonné par IFP Energies nouvelles

10

De la recherche à l'industrie

IFP Energies nouvelles a mis en place depuis de nombreuses années une grande variété de partenariats technologiques afin de valoriser ses travaux de R&D à l'échelle industrielle.

Ainsi, IFP Energies nouvelles développe activement des collaborations industrielles, à travers notamment sa participation à des projets pilotes, qui lui permettent de tester les technologies novatrices qu'il développe, mais également de préparer la mise sur le marché des outils logiciels et des équipements qu'il met au point.







ACTUALITÉS
QUI SOMMES-NOUS ?
LE STOCKAGE DU CO₂
NOTRE OFFRE
CONTACTS

Geogreen

Le transport et le stockage du CO₂ constituant un secteur industriel émergent, IFP Energies nouvelles, Géostock et le BRGM ont créé en 2007 la société Geogreen, qui propose aux industriels un éventail très large de services sur l'ensemble de la chaîne, du transport au stockage géologique du CO₂, de l'expertise amont à l'ingénierie et au développement de projets. À plus long terme, Geogreen proposera des prestations d'exploitation, de contrôle et de maintenance des sites d'injection, ainsi que des services de suivi liés à la fermeture de sites de stockage.

Centre de résultats Ressources

IFP Energies nouvelles a pour ambition de développer de nouvelles méthodes et technologies permettant de repousser les limites actuelles des réserves d'hydrocarbures et de donner accès à de nouvelles ressources énergétiques. Ces travaux sont menés dans le respect de l'environnement, notamment en limitant les émissions de CO₂ et en protégeant les ressources en eau.

Les programmes de recherche portent sur :

- le captage, le transport et le stockage géologique du CO₂ ;
- les logiciels et technologies pour l'exploration et la production d'hydrocarbures ;
- la gestion éco-efficace de l'eau ;
- les activités liées aux énergies marines et à l'éolien offshore.



IFP Energies nouvelles – Centre de résultats Ressources
Tél. : +33 1 47 52 60 85 – Fax : +33 1 47 52 70 04
Ressources@ifpenergiesnouvelles.fr

IFP Energies nouvelles
1 et 4, avenue de Bois-Préau – 92852 Rueil-Malmaison Cedex – France
Tél. : +33 1 47 52 60 00 – Fax : +33 1 47 52 70 00

Établissement de Lyon
Rond-point de l'échangeur de Solaize – BP 3 – 69360 Solaize – France
Tél. : +33 4 37 70 20 00

www.ifpenergiesnouvelles.fr