

CAPTAGE ET STOCKAGE DU CO₂

Le puits de carbone géologique

Isabelle Czernichowski-Lauriol, *email : i.czernichowski@brgm.fr*

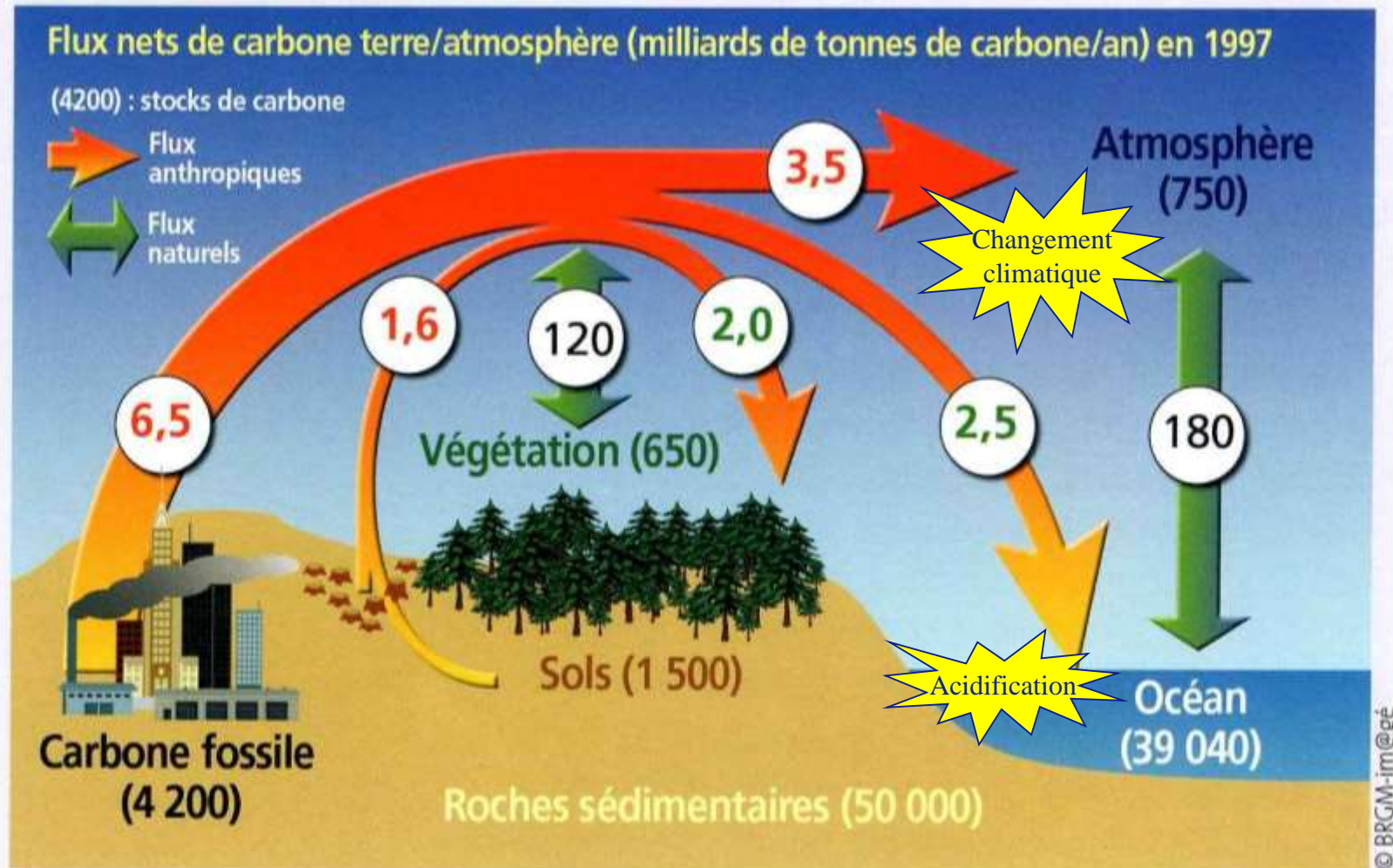
Déléguée à la Recherche et à l'Appui aux Politiques Publiques

Présidente Emérite de l'association CO₂GeoNet, le réseau d'excellence européen

BRGM – Service Géologique National, Direction du Développement

ECOCLIM2021 - 7 au 10 Juin 2021

La principale cause du réchauffement climatique : *le déstockage du carbone du sous-sol*



Emissions mondiales de CO₂ anthropique

(moyenne 2002-2011, GIEC AR5) :
9 Gt C /an (soit 34 Gt CO₂ /an)

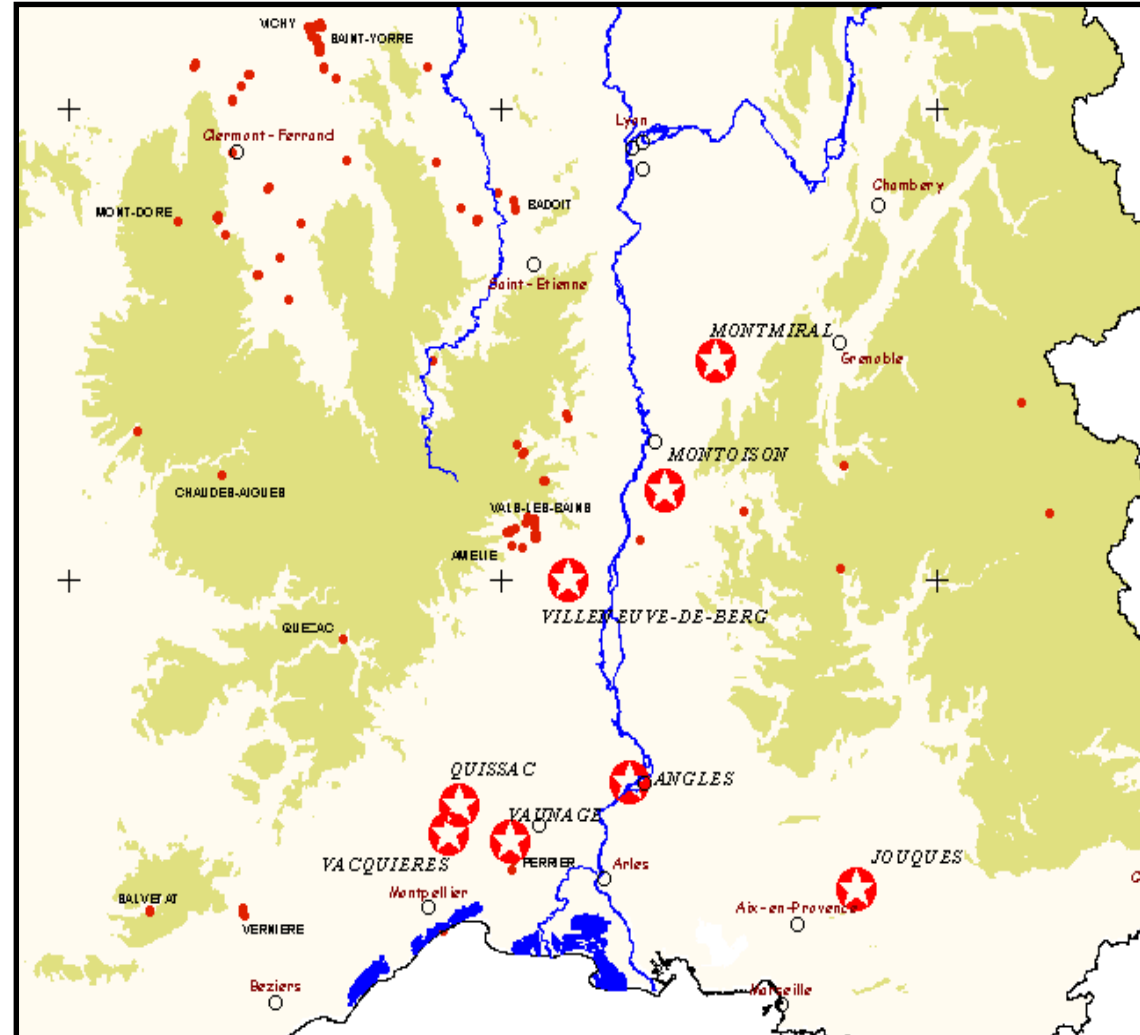
- 90% dues à l'utilisation des combustibles fossiles (+ production de ciment)
- 10% dues aux changements d'utilisation des sols (déforestation, pratiques agricoles)

Renvoyons le Carbone dans le sous-sol !

Une boucle vertueuse pour l'environnement et le climat

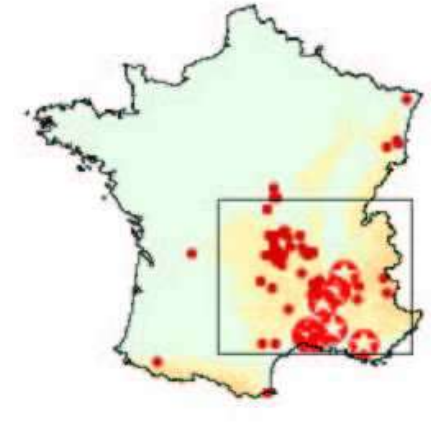
Il existe sous terre des **stockages naturels de CO₂** dans de nombreux pays

Les formations géologiques peuvent piéger de très grandes quantités de CO₂ pendant des millions d'années



La province carbogazeuse française

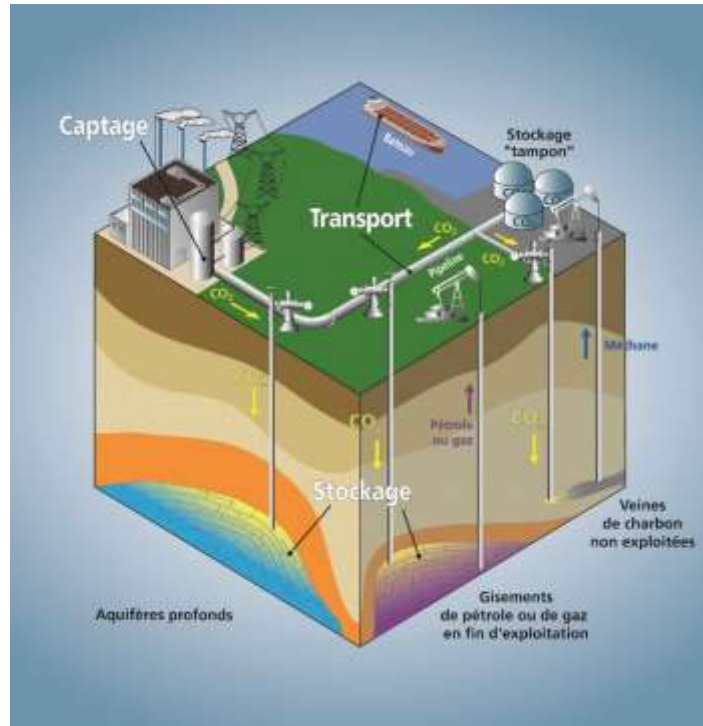
N·A·S·C·E·N·T



- ★ **Gisements naturels de CO₂**
- **Eaux carbogazeuses exploitées** (boissons, thermalisme)

Captage et Stockage du CO₂ : le principe (1)

(CSC ou CCS en anglais)



3 étapes :

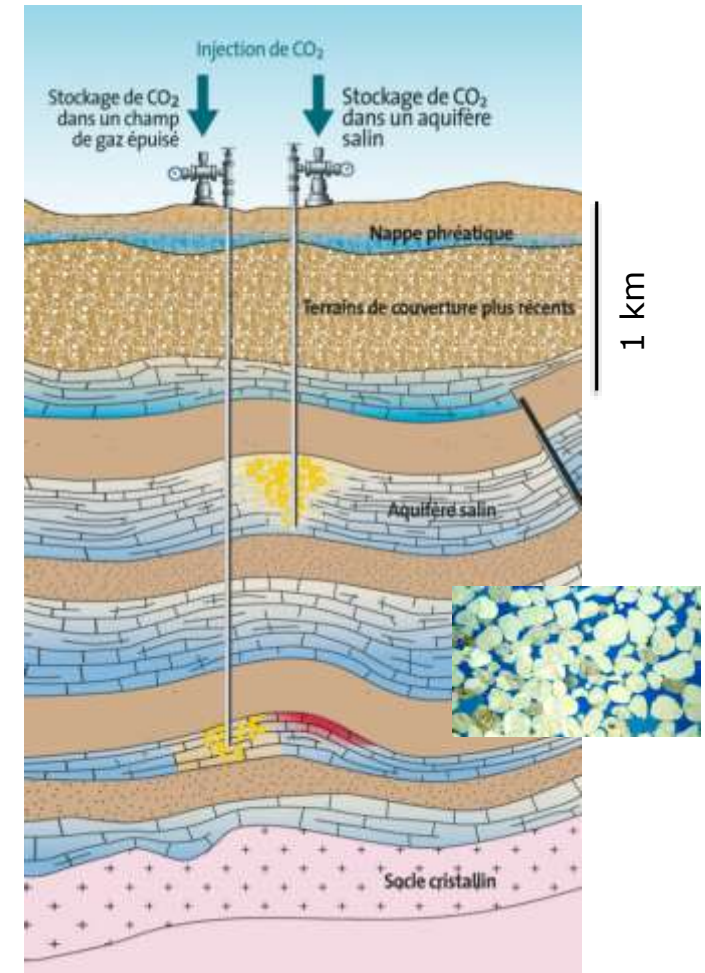
- ❖ Captage
- ❖ Transport
- ❖ Stockage géologique

CSC
(CCS en anglais)

+ 1 étape :

- ❖ Valorisation /Utilisation

CSCV
(CCUS en anglais)



Capacité mondiale de stockage géologique :
au moins 2000 Gt de CO₂
(GIEC 2005)

Stocker le CO₂ dans le sous-sol pour :

- ➔ Réduire massivement les émissions de CO₂ résiduelles des industries (aciéries, cimenteries, incinérateurs de déchets, usines chimiques et agroalimentaires, verreries, raffineries, centrales thermiques à charbon et gaz, production d'H₂ ...)
- ➔ Retirer du CO₂ de l'atmosphère (scénarios dits à émissions négatives) par exemple via le couplage à la biomasse énergie (BECCS) ou par la capture directe de CO₂ de l'atmosphère (DACCS)

Captage et Stockage du CO₂ : le principe (2)

(CSC ou CCS en anglais)

Vidéo d'un projet écossais en préparation : <https://www.youtube.com/watch?v=Bi3-k6wfXh8>



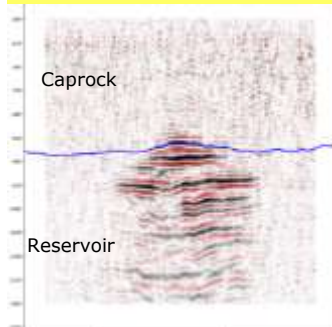
Lignes de conduite pour la sécurité d'un site de stockage de CO₂

1. **Choix du site adéquat et bonne caractérisation** - réservoir, roche couverture, formations sus-jacentes, failles, puits pré-existants, nappe phréatique, environnement de surface
2. **Évaluation appropriée du risque** (fuites, mouvements du sol ...)
3. **Opérations d'injection et de fermeture du site menées correctement** : contrôle de la composition du gaz injecté et de la pression, bonne adéquation entre modélisation et mesures, bouchage des puits
4. **Surveillance attentive** : migration du CO₂, étanchéité de la roche couverture et des puits, nappe phréatique, surface du sol ou plancher marin, écosystèmes
5. **Plan de mesures correctives**

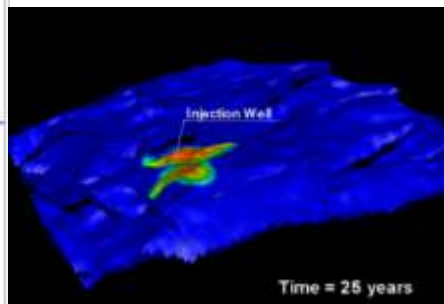
Il existe :

- ❖ Une directive européenne sur le stockage géologique du CO₂ (2009), transposée en droit français
- ❖ Des normes ISO internationales

Une large gamme d'outils et de méthodologies ont déjà été élaborés pour chacun de ces 5 critères



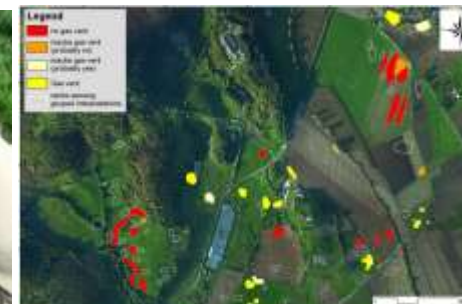
Sismique



Modélisation



Gaz des sols



Téledétection

Un début de mise en œuvre dans le monde



Ref.: Global CCS Institute, 2020: The Global Status of CCS: 2020. Australia.

- *Stockages de CO₂ souterrains sur les continents et sous la mer*
- *Pour réduire les émissions de CO₂ de la production d'électricité et de l'industrie*

En 2020, 65 opérations de captage et stockage de CO₂ en divers stades de développement dans le monde :

- ➔ **26 en opération**, captant et stockant au total environ 40 Mt CO₂/an, dont seulement 2 en Europe (Sleipner et Snohvit en Norvège)
- ➔ 2 en arrêt temporaire (raison économique, incendie)
- ➔ 3 en construction
- ➔ 13 en phase de développement avancé
- ➔ 21 en début de développement

Saut d'échelle à effectuer :
de 40 Mt CO₂/an en 2020 à
> 5 Gt CO₂/an en 2050*

* IEA Sustainable Development Scenario (IEA's World Energy Outlook 2019)

FIGURE 6 WORLD MAP OF CCS FACILITIES AT VARIOUS STAGES OF DEVELOPMENT*

Principaux projets en préparation en Europe

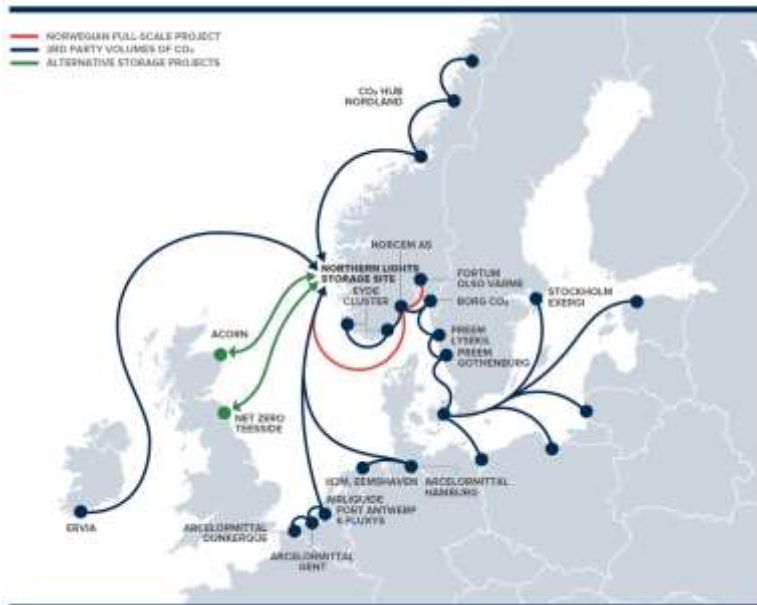


FIGURE 19 POTENTIAL SOURCES OF CO₂ FOR NORTHERN LIGHTS¹⁰

Norvège - Northern Lights

Stockage en aquifère salin profond :

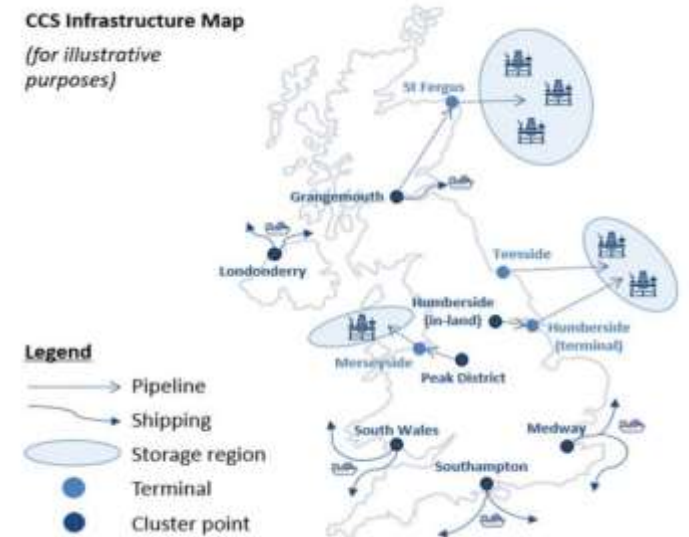
- 1.5 Mt CO₂/an en phase 1 dès 2024 (via 1 ou 2 puits)
- 5 Mt CO₂/an en phase 2
- Capacité : 5 Mt par an pendant 25 ans = 125 Mt CO₂
- Phase 1 : 120 € la tonne de CO₂ transportée et stockée (capex+opex)
- Ambition Phase 2 : 45 € par tonne de CO₂

Royaume-Uni – fin 2020, le gouvernement a publié un **Plan en 10 points pour une révolution industrielle verte** :

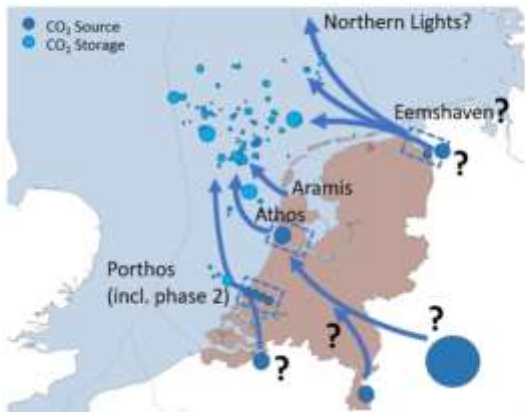
- Point 8 consacré à l'investissement dans le CSCV
- Ambition de capter 10 Mt CO₂/an d'ici 2030

CCS Infrastructure Map

(for illustrative purposes)



CCS potential – examples from source to sink



Pays-Bas - Porthos Port de Rotterdam

Stockage en réservoir de gaz déplété :

- 2.5 Mt CO₂/an dès 2024 pendant 15 ans
- Capacité : 37,5 Mt CO₂



Spérez un projet de stockage de CO₂ sous-marin en mer du Nord dans l'aquifère salin Endurance à moins de 100 km des côtes britanniques.

Quelques politiques européennes de soutien au CSCV

CCS and CCU Implementation Plan



SET-Plan ACTION n°9 - Implementation Plan – 21 09 2017

SET-PLAN TWG9 CCS and CCU Implementation Plan



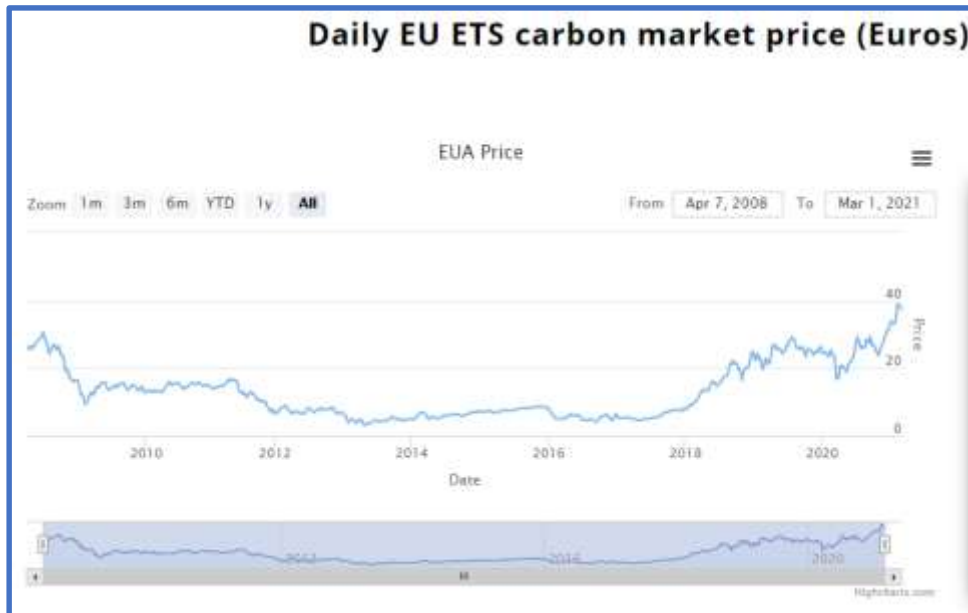

Horizon Europe

THE NEXT EU RESEARCH & INNOVATION PROGRAMME (2021–2027)

CCUS will play a crucial role in **Horizon Europe / European Green Deal**

The **Innovation Fund** will support:

- up to 60% of the additional capital and operational costs (up to 10 years) of large-scale projects
- up to 60% of the capital costs of small-scale projects




CEF programme

Connecting Europe Facility building the cross-border infrastructure for a clean energy system

Allowances do not need to be surrendered when CO₂ is geologically stored (CCS)
Updated ETS will strengthen the carbon signal



EUROPEAN COMMISSION
SUSTAINABLE FINANCE

FINANCING A SUSTAINABLE EUROPEAN ECONOMY

TECHNICAL REPORT

Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance

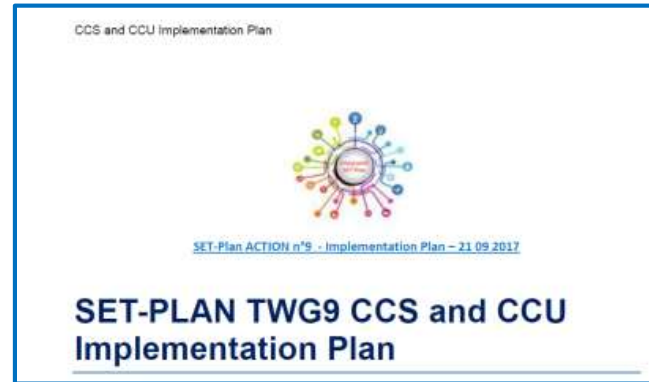
CCS included in the **sustainable taxonomy**

(Article 10 'Substantial contribution to climate change mitigation')

La France et la coopération internationale sur le CSCV

➤ EU SET Plan IWG9 on CCS & CCU

➤ ECCSEL ERIC



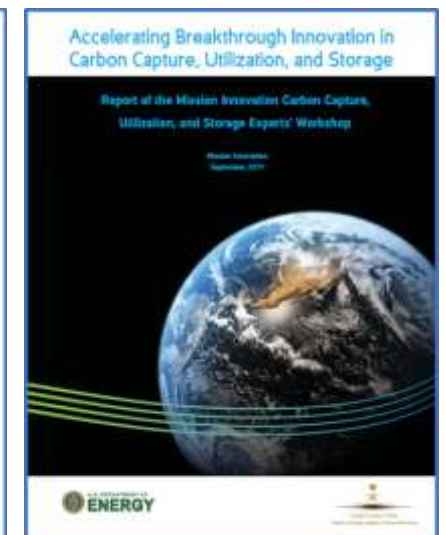
➤ IEAGHG



➤ CSLF



➤ Mission Innovation Challenge 3 on CCUS



➤ ISO TC265 on CCS



Extraits de la Stratégie Nationale Bas Carbone, avril 2020



La neutralité carbone

C'est un équilibre entre :

- les émissions de GES sur le territoire national ;

- l'absorption de carbone :

- par les écosystèmes gérés par l'être humain (forêts, sols agricoles...);

- par les procédés industriels (capture et stockage ou réutilisation du carbone).



Facteur 6

La neutralité carbone implique de diviser nos émissions de GES au moins par 6 d'ici 2050, par rapport à 1990.

Emissions
incompressibles

Puits de
carbone

- À l'horizon 2050, un certain niveau d'émissions de gaz à effet de serre **paraît incompressible**, en particulier dans les secteurs non énergétiques
- Ces émissions doivent être compensées par des **puits de carbone** :
 - Le puits du secteur des terres (forêt et terres agricoles) optimisé et durable
 - **Le puits technologique de captage et stockage de CO₂**
- Le **CSC** est mobilisé dans le scénario de référence visant à atteindre la neutralité carbone pour la France en 2050 :
 - **Puits de carbone de 15 Mt CO₂/an en 2050** :
 - ✓ 5 Mt pour décarboner l'industrie
 - ✓ 10 Mt sur les installations de production d'énergie à partir de biomasse pour retirer du CO₂ de l'atmosphère (BECCS - émissions négatives)

Comptes Rendus
Géoscience — Sciences de la Planète
2020, 352, n° 4-5, p. 383-399
<https://doi.org/10.5802/crgeos.20>



Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

Captage et Stockage du CO₂ : le puits de carbone géologique

CO₂ Capture and Storage : the geological carbon sink

Isabelle Czernichowski-Lauriol^a

^a BRGM et CO₂GeoNet, 3 av. Claude-Guillemain, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2,
France
Courriel : ic.fernichowski@brgm.fr

En France – des approches territoriales à construire (1)

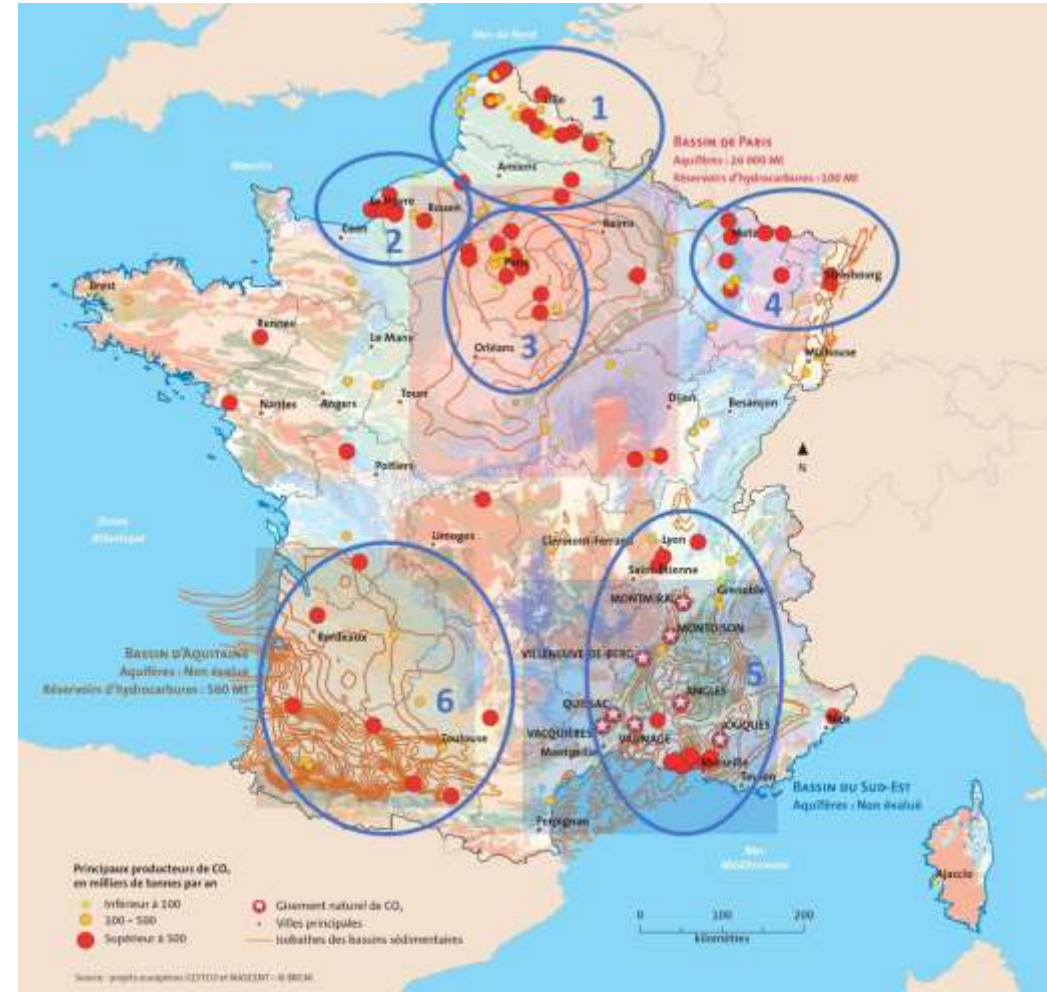
Afin de compenser les émissions ultimes en s'adaptant aux spécificités et besoins des territoires

1. Dunkerque et les Hauts-de-France

- Emissions de CO₂ industrielles (2017) : **19 MtCO₂/an**
- Pacte de neutralité carbone signé en 2019 pour le territoire dunkerquois
- *Projet H2020 3D (2019-2022) : Pilote captage de CO₂ sur l'aciérie d'ArcelorMittal à Dunkerque, études pour transport et stockage sous la mer du Nord*

2. Le Havre et la Normandie

- Emissions de CO₂ industrielles (2017) : **10 MtCO₂/an**
- *Projet ADEME C2A2 (2013-2014) : Pilote captage de CO₂ sur centrale à charbon d'EDF au Havre*
- *Projet ADEME CRYOCAP H₂ (2011-2016) : Air Liquide capte du CO₂ depuis 2015 sur son unité de production d'hydrogène par reformage de gaz naturel à Port-Jérôme*
- *Projets ADEME Axe Seine (en cours) et 7^{ème} PCRD COCATE (2010-2012) : Hub CO₂ à l'étude pour capter le CO₂ (Le Havre, Port-Jérôme, Rouen) et transport/stockage sous la mer du Nord*



Cf. article GHGT-15 - Czernichowski-Lauriol et al. 2021:
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3821672

En France – des approches territoriales à construire (2)

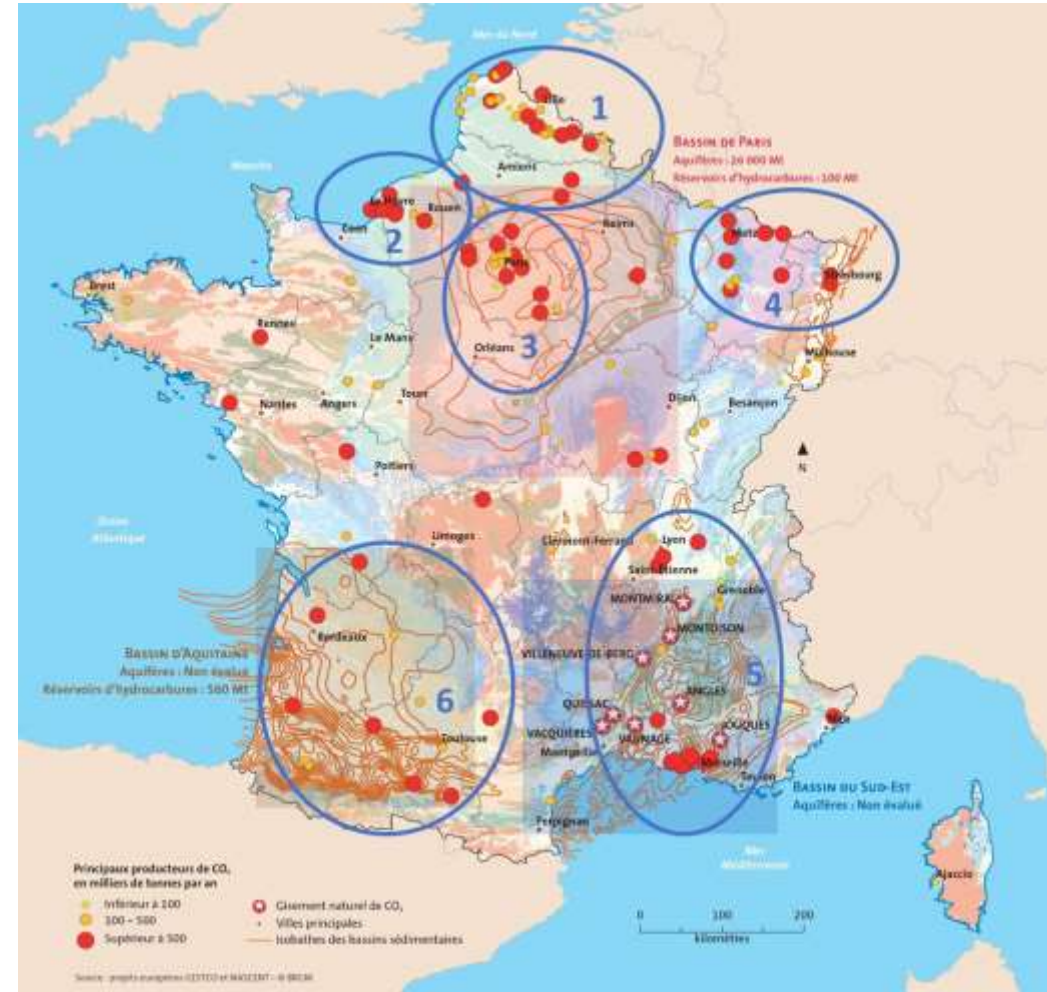
Afin de compenser les émissions ultimes en s'adaptant aux spécificités et besoins des territoires

3. Paris, l'Île de France et le Centre-Val de Loire

- Emissions de CO₂ industrielles (2018) : **5 MtCO₂/an**
- Capacité de stockage théorique : 8000 MtCO₂ onshore (aquifères salins et réservoirs d'HC)
- Projet H2020 STRATEGY CCUS (2019-2022) : Scénarios locaux de développement du CSCV
- Projet H2020 PilotSTRATEGY (2021-2025) : Caractérisation géologique d'un secteur pour proposer la construction d'un pilote de stockage de CO₂
- Projet régional CVL CO2SERRE (2019-2022) : Etude d'un scénario BioEnergy-CSCV (BECCS – émissions négatives)
- Projet régional CVL GEOCO2 (2019-2021) : Potentiel régional pour du stockage du CO₂ combiné à de la géothermie (concept CO₂-Dissolved)

4. Florange et le Grand-Est

- Projet ADEME TGR-BF (2009-2013) : Préparation d'un projet de démonstration de CSC sur l'aciérie d'ArcelorMittal à Florange, avec stockage onshore (aquifère salin)
- Soumission par AM au NER300 européen, retirée fin 2012 suite à la décision de fermer l'aciérie
- Projet ADEME VALORCO (2014-2017) : Valorisation des émissions de CO₂ inévitables d'AM



Cf. article GHGT-15 - Czernichowski-Lauriol et al. 2021:
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3821672

En France – des approches territoriales à construire (3)

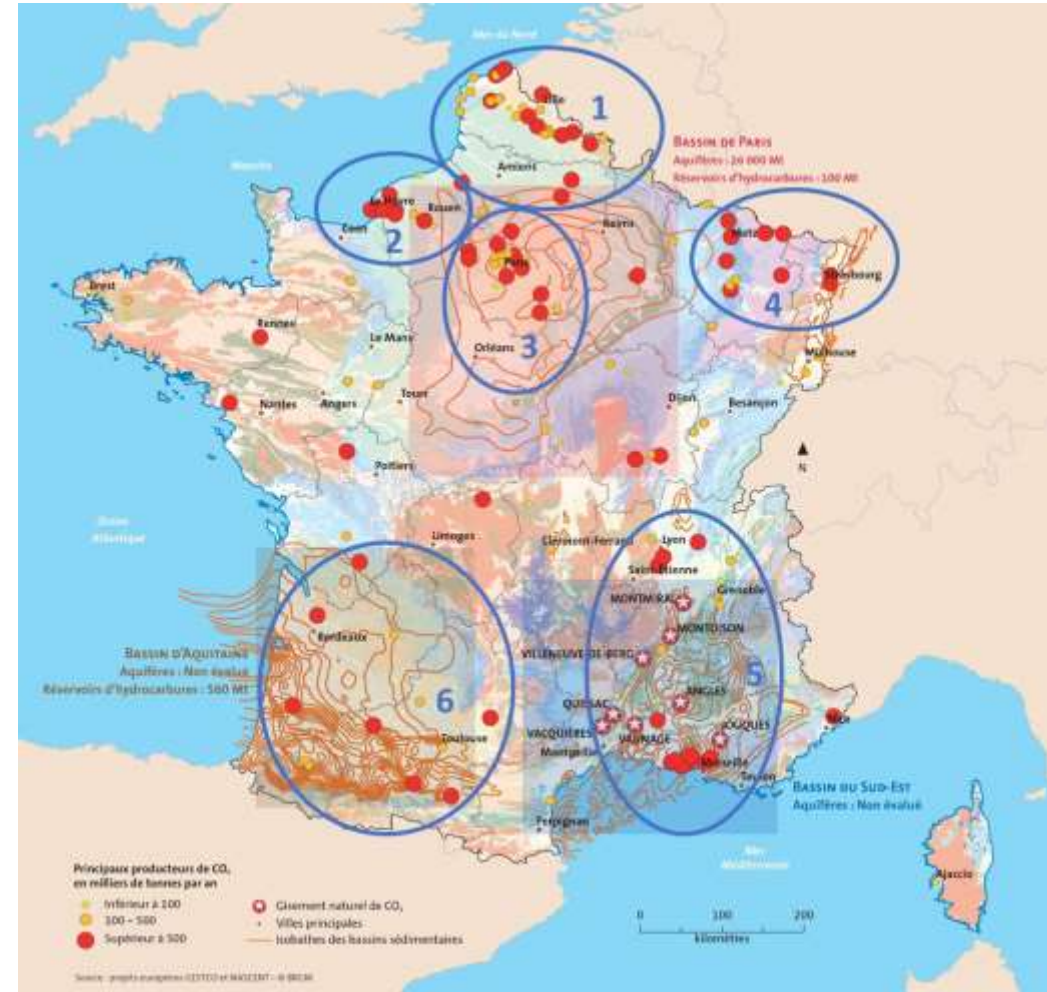
Afin de compenser les émissions ultimes en s'adaptant aux spécificités et besoins des territoires

5. Vallée du Rhône, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Auvergne-Rhône-Alpes

- Emissions de CO₂ industrielles (2018) : **19 MtCO₂/an**
- Gisements naturels de CO₂ (analogues naturels)
- Potentiel de stockage de CO₂ onshore et offshore pas encore évalué (aquifères salins), sauf dans la région de Fos : capacité théorique de 54 MtCO₂ - projet ADEME VASCO (2011-2012)
- Pilotes d'utilisation du CO₂ en cours (production d'algues, méthane, méthanol, biométhanol)
- Hydrogène dans stratégies des régions PACA et AURA, synergies avec le CSCV envisagées
- Projet H2020 STRATEGY CCUS (2019-2022) : Scénarios locaux de développement du CSCV

6. Le bassin aquitain et la Nouvelle-Aquitaine

- Emissions de CO₂ industrielles (2017) : **3 MtCO₂/an**
- Potentiel de stockage du CO₂ onshore dans réservoirs HC épuisés (capacité de stockage théorique de 560 MtCO₂). Aquifères salins onshore et offshore pas encore évalués
- Pilote CSC de TOTAL à Lacq-Rousse (2010-2013). 51 kt de CO₂ captées et stockées onshore dans un gisement de gaz épuisé (à 4,5 km de profondeur)
- Projet PYCASSO : Démarches en cours pour développer un démonstrateur captant du CO₂ industriel et le stockant dans un réservoir d'hydrocarbures épuisé onshore



Cf. article GHGT-15 - Czernichowski-Lauriol et al. 2021:
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3821672

H2020 STRATEGY CCUS Project (2019-2022)

Project's objectives

To elaborate strategic plans for CCUS development in Southern and Eastern Europe at short term (up to 3 years), medium term (3-10 years) and long term (more than 10 years):

- Local CCUS development plans with local business models within promising regions, based on technical (emission+transport+storage+use+ETS), environmental (LCA) and societal aspects
- Connection plans with transport corridors between local CCUS clusters, and with the North Sea CCUS infrastructure

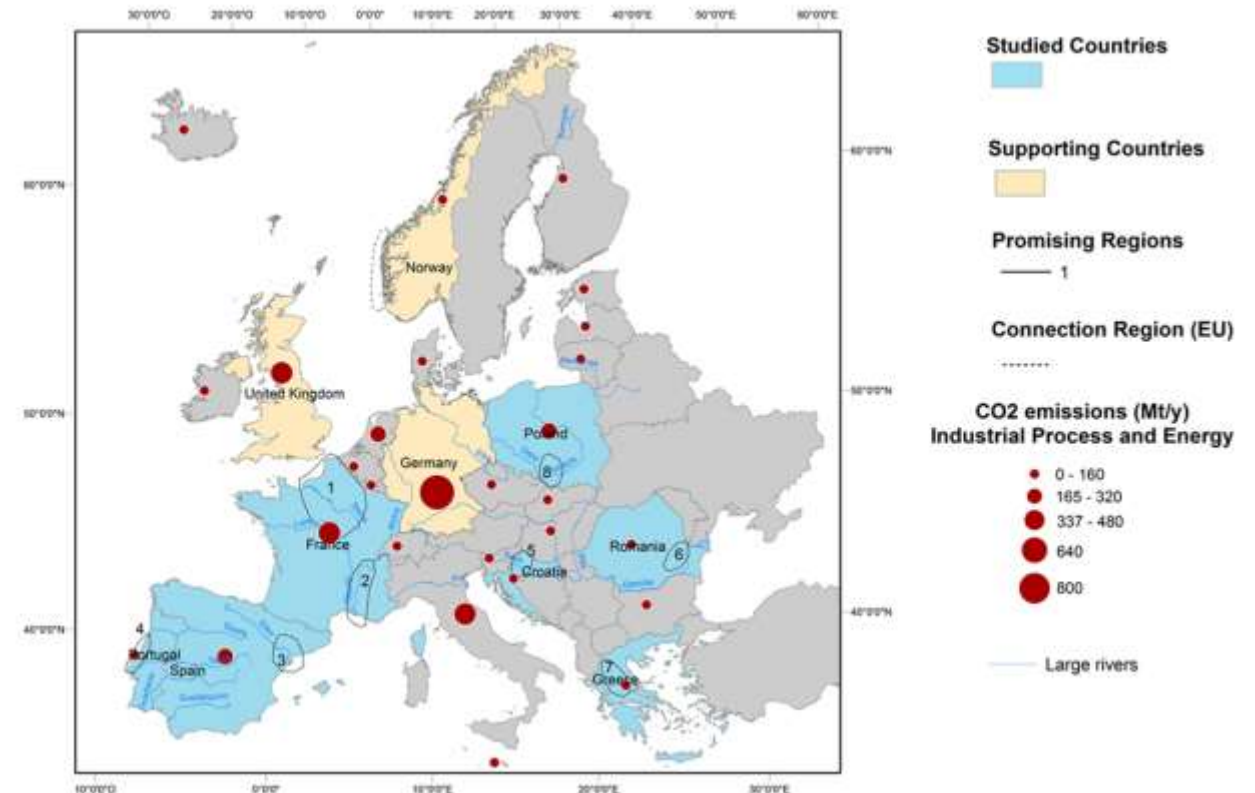
8 promising start-up regions

- Presence of an industrial cluster
- Possibilities for CO₂ storage and/or utilization
- Potential for coupling with H₂ production and use
- Previous studies carried out
- And a political willingness

Budget: 2.96 M€ (Coordination and Support Action)

Partners

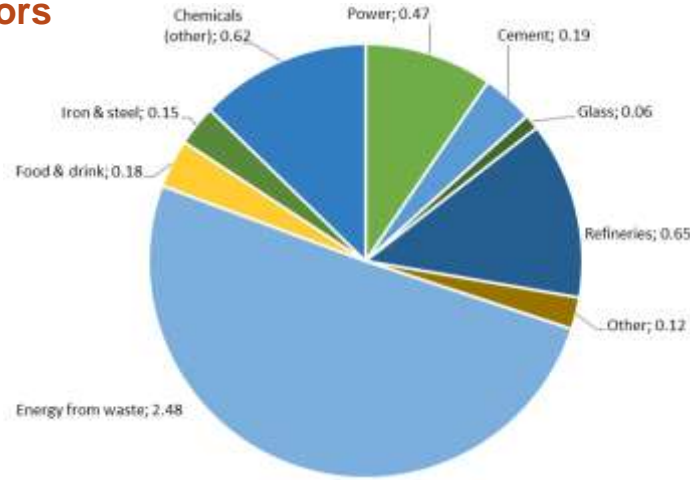
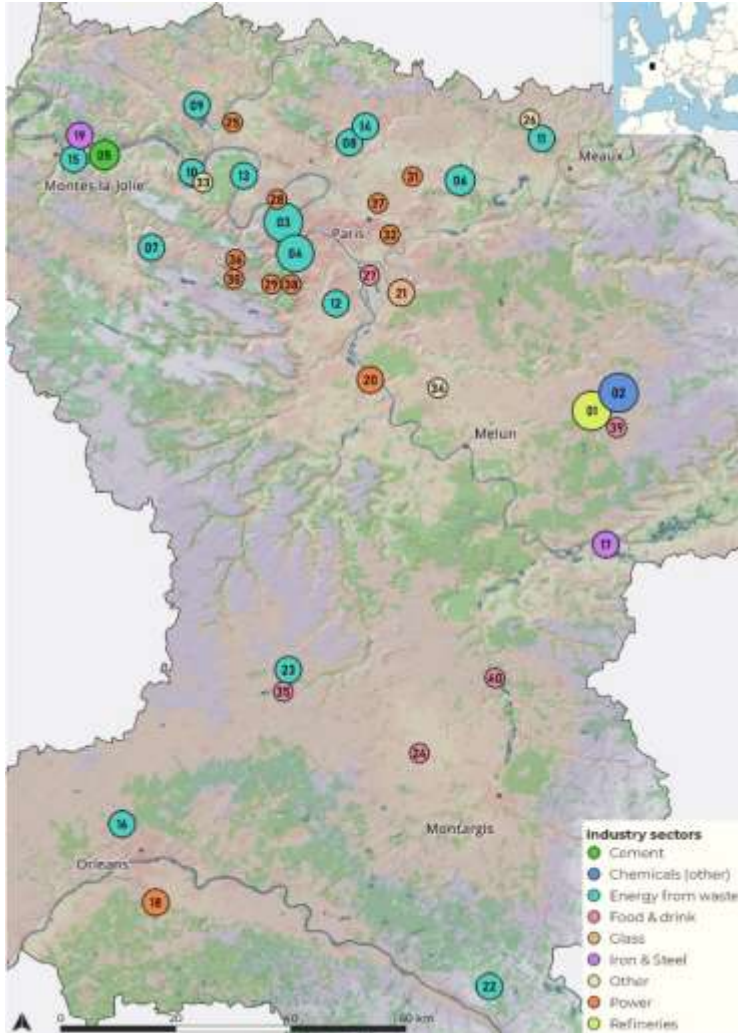
FR: BRGM, IFPEN, TOTAL; ES: IGME, CIEMAT; GR: CERTH;
HR: UNIZG-RGNF; PO: GIG; PT: UEVORA, FCT-NOVA, DGEG,
CIMPOR; RO: SNSPA, GeoEcoMar; DE: Fraunhofer-ISI; NO:
NORCE; UK: UEDIN



Projet H2020 STRATEGY CCUS – Bassin de Paris

BRGM coordonnateur

CO₂ Emissions (Mt/year) and industry sectors
- 4.9 Mt/y in 2018



CO₂ Storage capacity assessed:

- 222 Mt CO₂ (Deep Saline Aquifers)
 - Assessed in two blocks only (Keuper), through dynamic simulations
- 111 Mt CO₂ (Depleted Hydrocarbon Fields)
 - Assessed through volumetric calculations

CO₂ use:

- ✓ Greenhouses
 - CO₂SERRE project close to Orleans

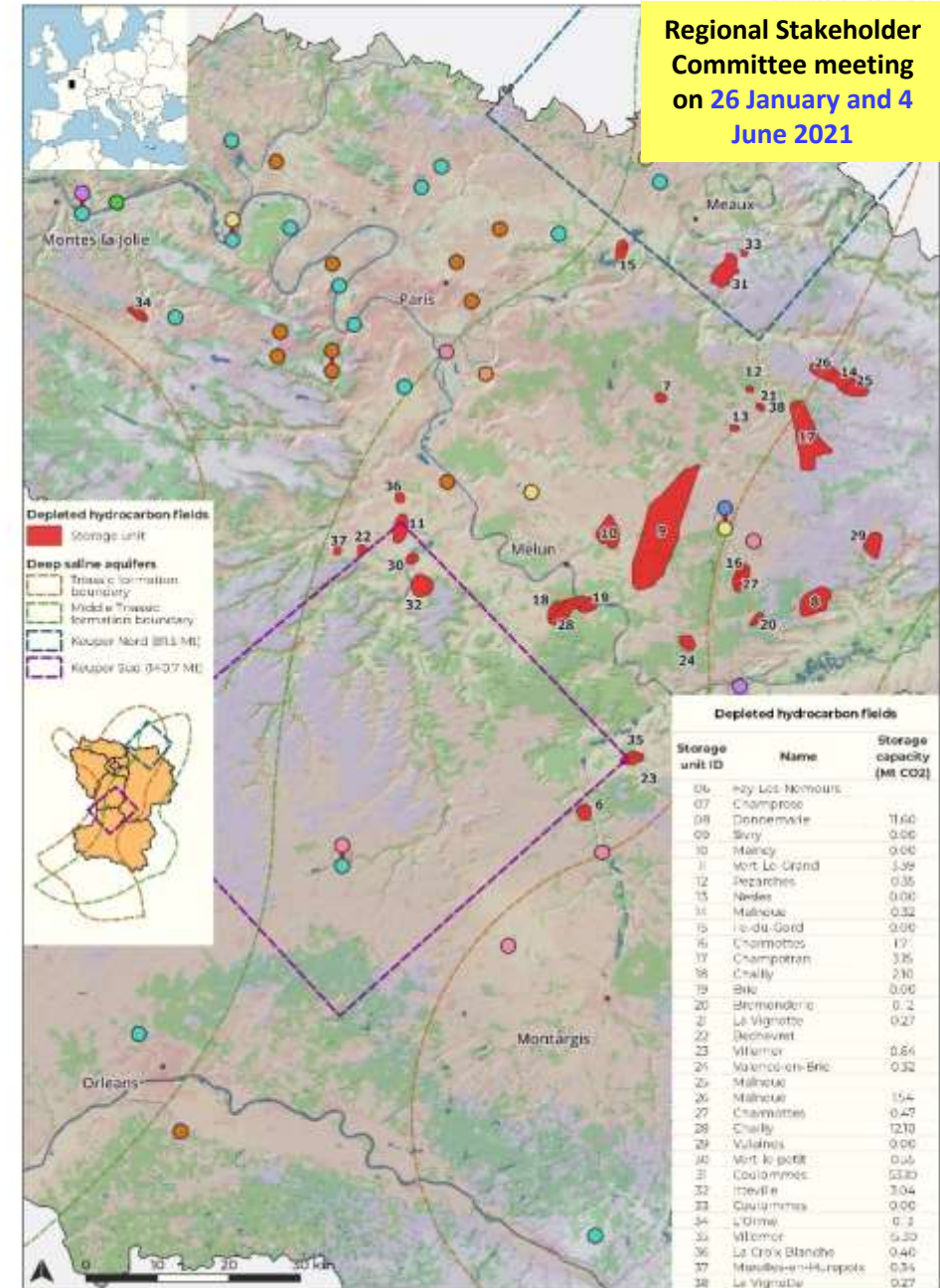
> 17



Paris basin | Storage units



Regional Stakeholder Committee meeting on 26 January and 4 June 2021



Valoriser et stocker le CO₂ issu de la transformation de la biomasse pour la culture sous serre

CO2SERRE

Un projet financé par la Région Centre-Val de Loire



« Réduire les émissions de CO₂ de la Région Centre – Val de Loire, tout en bénéficiant à l'économie locale », tel est l'objectif du projet de recherche CO2SERRE qui commence en Octobre 2019. Il vise à développer la technologie Captage, Stockage et Valorisation du CO₂ dans la Région afin de lutter contre le réchauffement climatique, en promouvant également l'économie circulaire.

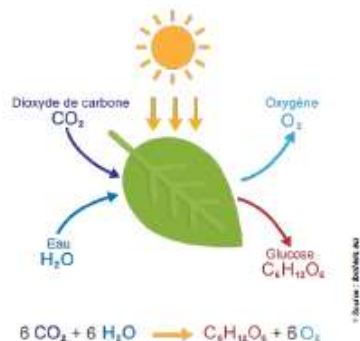
Le captage



Le CO₂ est issu de la **transformation de la biomasse**, comme les chaufferies biomasse ou les sucreries et distilleries (transformation de betterave).

Le CO₂ est **capté au niveau des sites producteurs**. Différentes techniques existent, selon la composition des fumées du site et la pureté du CO₂ requise.

L'utilisation dans les serres

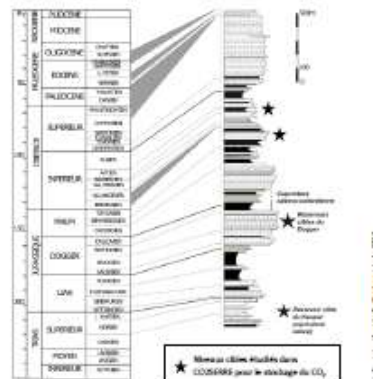


Le CO₂ est indispensable à la croissance des plantes, c'est la **photosynthèse**.

Pour **stimuler la croissance des plantes** et améliorer les rendements, de nombreux producteurs ajoutent du CO₂ dans les serres fermées.

Le stockage géologique

Le CO₂ non utilisé est injecté dans une formation géologique profonde, appelée réservoir, afin qu'il y reste **confiné de manière permanente**.



> Lithologie et stratigraphie type du Bassin de Paris

BECCS + Valorisation du CO₂

2020-2022

BRGM coordinateur

Partenaires :



Coupler stockage géologique de CO₂ et géothermie profonde en Région Centre-Val de Loire

GEOCO₂

Un projet financé par la Région Centre-Val de Loire



Solution adaptée aux petits émetteurs de CO₂ (< 150 kt CO₂/an)

2019-2021

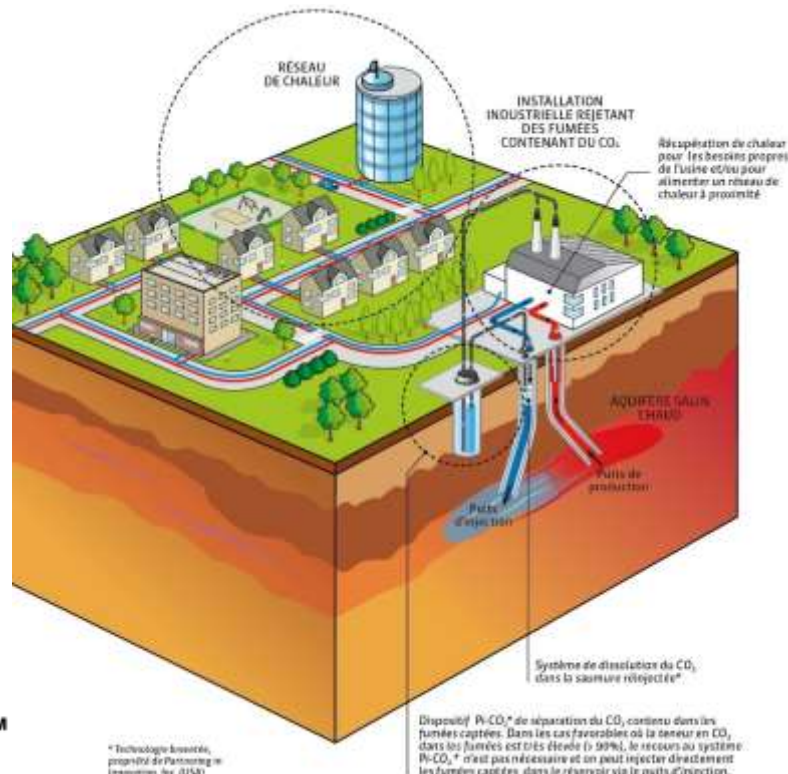
Réduire les émissions industrielles de CO₂ tout en produisant de l'énergie décarbonée : tel est le principe de l'approche « CO₂-DISSOLVED » développée au BRGM depuis 2013.

Le projet « GEOCO₂ » vise à étudier le potentiel de mise en œuvre de cette technologie innovante sur les sites industriels du territoire régional.

BRGM coordinateur



<http://co2-dissolved.brgm.fr/>



PRINCIPE

1. Capturer le CO₂ contenu dans les fumées d'une installation industrielle.
2. Extraire l'eau chaude d'une nappe aquifère profonde.
3. Récupérer les calories en surface pour, par exemple, alimenter un réseau de chaleur.
4. Réinjecter l'eau froide dans le même aquifère, après y avoir dissous le CO₂ capté qui restera séquestré définitivement dans l'eau de la nappe ainsi exploitée.

Plan de relance

➤ Elaboration de la **Stratégie d'accélération sur la décarbonation de l'industrie** :

- Ensemble d'objectifs et de moyens (AMI, AAP...) de la recherche au déploiement industriel
- Avec consultation des feuilles de route des Comités Stratégiques de Filières
- **Le CSCV sera inclus**
- Publication prévue en juin 2021
- Pourra bénéficier du 4^{ème} Programme d'investissements d'avenir (PIA4) annoncé par l'Etat en janvier 2021

Mémo :

À ce jour, 4 stratégies d'accélération sont engagées, dont :

- La Stratégie d'accélération pour **l'hydrogène décarboné**, publiée le 8 septembre 2020

11 autres stratégies d'accélération sont en cours d'élaboration

Stratégies d'accélération pour l'innovation

Les stratégies d'accélération sont au cœur du quatrième Programme d'investissements d'avenir (PIA4) dont les grandes lignes ont été annoncées par le Premier ministre en septembre 2020 à l'occasion de la présentation du plan France Relance. À travers ces stratégies d'accélération, il s'agit d'identifier les principaux enjeux de transition socio-économique de demain et d'y investir de façon exceptionnelle et massive dans une approche globale (financements, normes, fiscalité...). Le PIA 4 y consacrerait 12,5 milliards d'euros d'ici à 2025, sur les 20 milliards dont il est doté. L'objectif est de permettre à l'État, à travers un Conseil de l'innovation réuni régulièrement par le Premier ministre, de définir des priorités d'investissements et d'impulser de véritables transformations dans des secteurs ou technologies d'avenir tout au long du déploiement du programme.

<https://www.gouvernement.fr/strategies-d-acceleration-pour-l-innovation>

Le Club CO₂, l'équipe de France du CSCV



Nombre de membres en croissance : 30 membres en 2020

<https://www.club-co2.fr/fr>

BRGM : membre du CA et animateur du GT COM



GHGT-16 Conference in France in 2022

<https://ghgt.info/>

For the 1st time!

GHGT-16

16TH GREENHOUSE GAS CONTROL
TECHNOLOGIES CONFERENCE



Save the date
Enjoy the place


23-27 OCTOBER 2022!
LYON in FRANCE!

“WE ARE READY TO WELCOME YOU”

The GHGT-16 French Team



Conclusions

- Le Captage et Stockage de CO₂ est un **puits de carbone prometteur**, à mettre en œuvre en complément à toutes les démarches de réduction des émissions de CO₂
- Freins pour le déploiement : essentiellement économiques et sociétaux
 - Mais aussi techniques : caractérisation des **sites de stockage** (injectivité, capacité, étanchéité) et de leur évolution à long-terme (incluant sûreté)
- **Recherche & Innovation** toujours encouragée pour améliorer les performances, réduire les coûts, imaginer des procédés de rupture 
- Synergies possibles avec les **énergies renouvelables** :
 - **Biomasse** (émissions négatives)
 - **Géothermie** (extraction de chaleur)
 - **Stockage d'énergie** – Power to Gas (transformation du CO₂ en hydrocarbures synthétiques avec de l'**hydrogène vert** produit par électrolyse de l'eau)
- Schémas de déploiement à concevoir et adapter **pour chaque territoire**, en concertation avec tous les acteurs
- Nécessité d'intégrer le CSCV dans les plans climat-énergie territoriaux

Stratégie Nationale Bas Carbone, avril 2020 :

Orientation I 2 : Engager dès aujourd'hui le développement et l'adoption de **technologies de rupture** pour réduire et si possible supprimer les émissions résiduelles :

dont « **Soutenir les développements d'unités pilotes et éventuellement commerciales en capture et stockage du carbone (CSC) et en capture et utilisation du carbone (CUC)** »