

PCAET

PLAN CLIMAT
AIR ENERGIE
TERRITORIAL

Construire ensemble
Grand Paris Seine & Oise

Elaboration d'un diagnostic « Séquestration actuelle et potentielle de carbone » du territoire Grand Paris Seine & Oise

I.	INTRODUCTION.....	2
II.	LE STOCK DE CARBONE DANS LES SOLS ET LA BIOSPHERE	3
I.	LA SEQUESTRATION ADDITIONNELLE ANNUELLE DANS LE SOL ET LA BIOSPHERE	5
II.	L'IMPACT DU CHANGEMENT D'AFFECTATION DES TERRES	6
I.	LE DESTOCKAGE CARBONE PAR LA CONSOMMATION DE BOIS-ENERGIE ...	8
I.	LA SEQUESTRATION CARBONE DE LA NATURE EN VILLE.....	8
I.	LES IMPACTS DE LA SUBSTITUTION ENERGIE ET MATERIAUX BIOSOURCES	8
II.	BILAN DE LA SEQUESTRATION CARBONE ANNUELLE SUR LE TERRITOIRE ...	9
I.	REMARQUES ET LIMITES DE LA METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA SEQUESTRATION CARBONE.....	10
II.	DEFINITION DES PISTES D'ACTIONS.....	10

INTRODUCTION

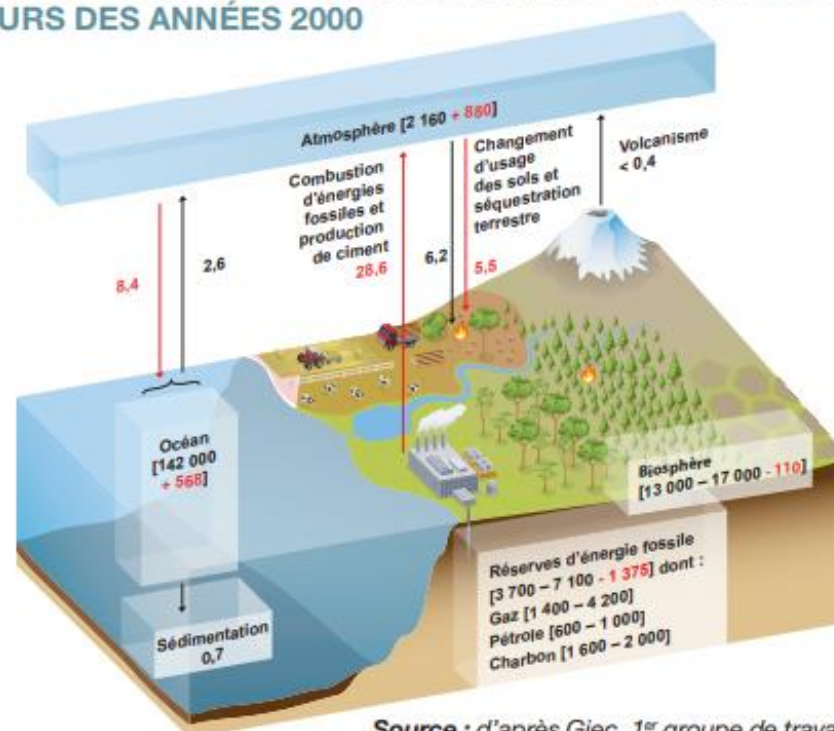
Les résultats d'études scientifiques portées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) expriment un consensus sur la principale cause du changement climatique : les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CH_4 , CO_2 , NO_2 et gaz fluorés). La concentration actuelle de dioxyde de carbone (CO_2) a en effet dépassé le seuil de 400 parties par millions (ppm - soit une proportion de 0,04 % du volume d'air atmosphérique), alors que la teneur de l'ère pré-industrielle en 1750 était de 278 ppm.

Les gaz à effet de serre ont des origines différentes et n'ont pas tous les mêmes effets quant au changement climatique. En effet, certains ont un pouvoir de réchauffement plus important que d'autres et/ou une durée de vie plus longue. La contribution à l'effet de serre de chaque gaz se mesure grâce à son pouvoir de réchauffement global (PRG). Le PRG d'un gaz se définit comme le forçage radiatif (c'est à dire la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol), cumulé sur une durée de 100 ans. Cette valeur se mesure relativement au CO_2 , gaz de référence. Si le CO_2 est le gaz qui a le plus petit pouvoir de réchauffement global, il est celui qui a contribué le plus au réchauffement climatique depuis 1750, du fait des importantes quantités émises.

La séquestration de CO_2 est un mécanisme d'absorption du carbone atmosphérique de l'activité biologique au sein des espaces naturels terrestres et aquatiques. Ainsi, par leur capacité de stockage du CO_2 , les océans (phytoplancton, calcaire), les sols (matière organique, roches, sédiments) et la biosphère (matière organique issue des êtres vivants dont la forêt, les cultures, etc.) contribuent à diminuer la concentration de CO_2 atmosphérique et jouent donc un rôle primordial de régulation du climat. En France, les terres agricoles et la forêt occupent plus de 80 % du territoire national et séquestrent entre 15 et 18 Gt CO_2 par an, soit près de la moitié des émissions de CO_2 libérées en moyenne au cours des années 2000 en France par

les activités humaines. Toute variation de ce stock a un impact sur les émissions nationales de gaz à effet de serre.

RÉSERVOIRS ET FLUX DE GES : EXEMPLE DU CYCLE DU CO_2 AU COURS DES ANNÉES 2000



Source : d'après Giec, 1^{er} groupe de travail, 2013

Ce graphique présente : (i) entre crochets, la taille des réservoirs aux temps préindustriels en milliards de tonnes d'équivalent CO_2 en noir et leur variation sur la période 1750-2011 en rouge ; (ii) sous forme de flèches, les flux de carbone entre les réservoirs en milliards de tonnes d'équivalent CO_2 par an. Les flux préindustriels sont en noir. Ceux qui sont liés au développement des activités anthropiques entre 2000 et 2009 sont en rouge.

Ce diagnostic constitue le volet 2 des études d'atténuation & d'adaptation dans le cadre du PCAET de Grand Paris Seine et Oise (GPS&O). Il présente l'estimation de la séquestration actuelle et potentielle de CO₂ du territoire de GPS&O. La méthodologie employée constitue une première approche suffisante pour estimer les ordres de grandeur, permettant d'identifier la contribution des différents réservoirs de carbone à la réduction de la concentration atmosphérique du CO₂. Elle s'appuie principalement sur les résultats issus de l'outil ClimAgri, exploité pour l'étude du volet 4 de la présente mission (secteurs de l'agriculture et de la forêt), et sur les méthodes de calcul du cahier technique de l'ADEME, complétée par des coefficients de stockage donnés par l'INRA, le REFORA, l'OREGES et l'Alterre Bourgogne. L'estimation de la séquestration de carbone intègre :

- Le stock de carbone dans le sol.
- Le stockage de carbone dans la biosphère.
- Le déstockage de carbone associé aux changements d'affectation des sols.
- le déstockage de carbone associé à la consommation du bois-énergie.
- L'impact positif de la consommation de matériaux et énergies biosourcés par substitution aux matériaux et énergies traditionnelles.

Comparée aux niveaux d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre, la séquestration de carbone permet d'évaluer l'impact carbone du territoire et identifier les enjeux et les pistes d'actions associés à la lutte contre le changement climatique.

LE STOCK DE CARBONE DANS LES SOLS ET LA BIOSPHERE

1. Le rôle des sols

La photosynthèse est le principal moteur de séquestration terrestre du CO₂. Ce mécanisme naturel régit la croissance des plantes en assurant la synthétisation de biomolécules et la libération d'O₂ à l'aide de l'énergie lumineuse reçue du soleil et à partir de CO₂, d'H₂O et d'éléments minéraux (N, P, K, etc.). Elle permet donc l'extraction du carbone atmosphérique et la fixation du carbone dans la matière organique ou biomasse, un réservoir de carbone temporaire. Naturellement et lors de sa décomposition, la biosphère riche en matière organique est piégée dans les couches superficielles du sol, puit de carbone durable. Les sols sont ainsi à la fois le socle du développement des organismes photoautotrophes consommateurs de CO₂ et un puit de carbone. Ils jouent donc un rôle très important dans le cycle du carbone et pour l'équilibre des concentrations atmosphériques.

2. L'occupation des sols à GPS&O

La communauté urbaine Grand Paris Seine et Oise représente un territoire de 500 km. En termes d'occupation de l'espace, 40 % du territoire est dédiée à l'agriculture et 23 % aux boisements (source : diagnostic et stratégie agricole et forestière du territoire de GPS&O partir du MOS, IAU Île-de-France). Le tissu urbain dense est principalement concentré le long de la Seine. Les espaces forestiers et agricoles sont diffus sur l'ensemble du territoire. L'agriculture est bien implantée sur les plateaux et sur les bords de Seine, à l'Ouest. La forêt, est implantée sur les coteaux et les vallées secondaires, avec 4 pôles importants que sont les massifs de l'Hautil, du Chesnay, de Rosny et des Alluets.

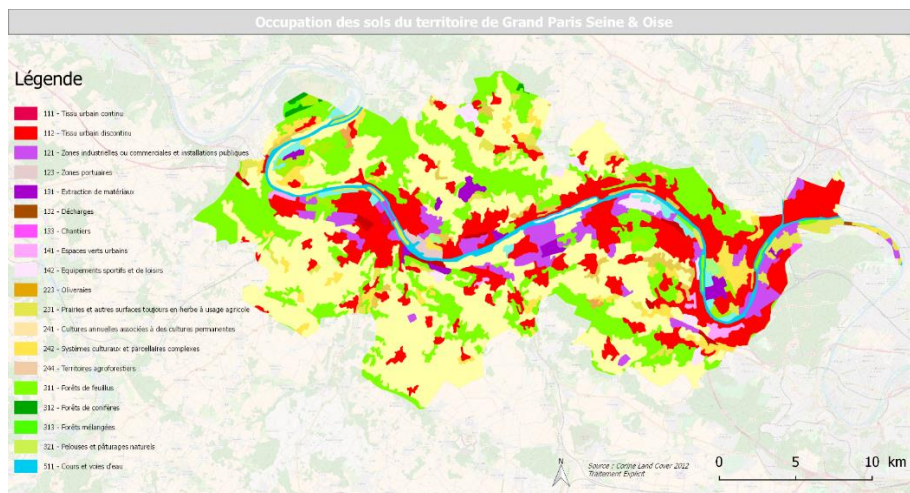


Figure 1 : Carte d'occupation des sols de GPS&O (Source : CLC 2012, traitement Explicit)

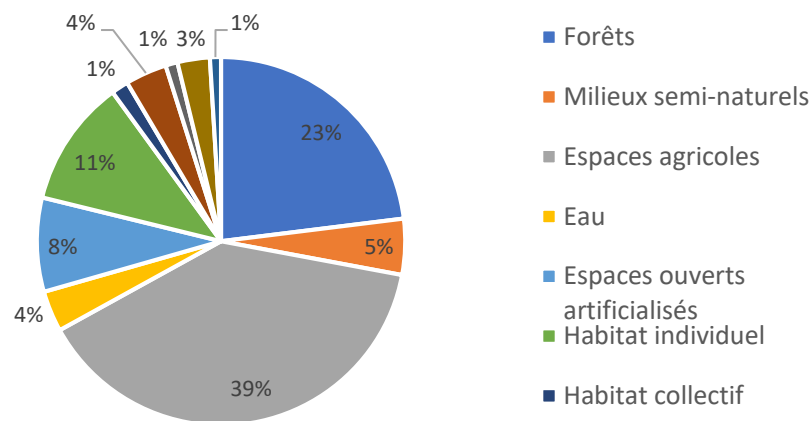


Figure 2 : Répartition de l'occupation des sols du territoire de GPS&O (Source : MOS IAU 2012)

3. Le stock de carbone actuel dans les sols et la biosphère

Les résultats issus de la simulation ClimAgri, réalisée pour l'année de référence 2017 par Agrosolutions dans le cadre du volet 4 de la présente mission, indiquent les stocks de carbone suivants dans le sol et la biomasse aérienne :

Tableau 1 : Stock de carbone dans le sol et la biomasse aérienne

	Mt eq. CO2	Mt c	t c/ha
Stock de carbone (état) : sol + biomasse aérienne forestière	9.27	2.53	88.33
Stock de carbone dans les sols	6.49	1.77	61.87
Sols agricoles	3.40	0.93	52.18
Sols forestiers	3.09	0.84	77.80
Stock de carbone dans la biomasse aérienne (forêt + haies)	2.776	0.757	67.669
Forêts	2.751	0.750	69.321
Haies et Agro-foresterie	0.024	0.007	18.395

Près de 60% du carbone piégé sur le territoire est stocké dans les sols, avec une répartition équivalente entre les sols agricoles et forestiers.

Afin de déterminer la séquestration additionnelle et annuelle de carbone par la biosphère, il convient de distinguer différentes classes car elles ont des activités biologiques différentes et ainsi un potentiel de séquestration surfacique de carbone spécifique.

LA SEQUESTRATION ADDITIONNELLE ANNUELLE DANS LE SOL ET LA BIOSPHERE

Les forêts occupent près d'un quart du territoire, 23% précisément, soit un taux de boisement légèrement supérieur à celui de l'Île-de-France (21%) et cependant inférieur au taux national (28%). Les espaces forestiers sont assez bien répartis et participent à l'agrément des paysages en soulignant notamment les reliefs des plateaux. Une part non négligeable (18%) appartient aux collectivités publiques et sont donc ouverts à la promenade, l'Hautil excepté en raison des dangers d'effondrement, et même si toutes ne sont pas forcément particulièrement fréquentées¹. La surface boisée du territoire représente 12 226 Ha selon la base de données *Corine Land Cover* (année de référence 2012).

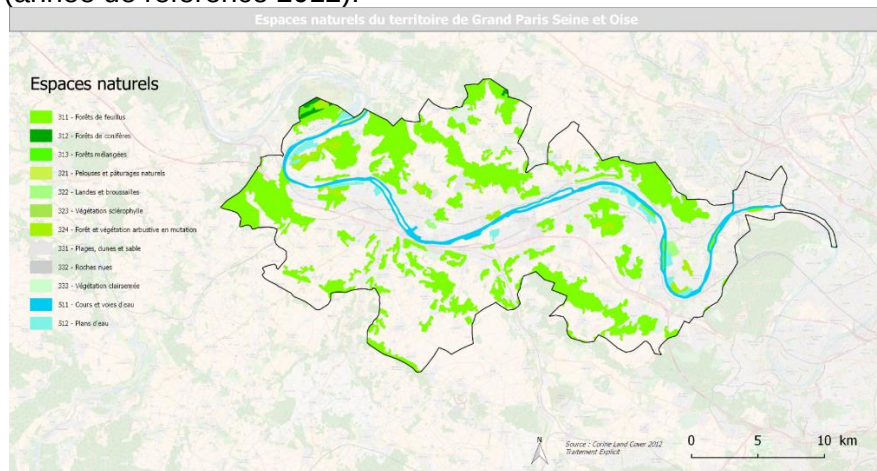


Figure 3 : Identification des forêts du territoire (Source CLC 2012)

Les terres agricoles (parcelles cultivées et prairies) du territoire sont réparties sur 17 330 ha, soit environ 34% du territoire.

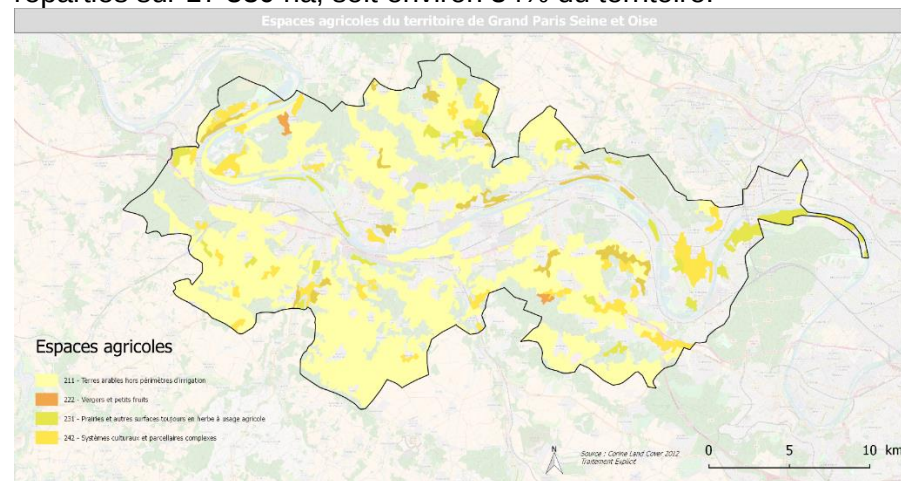


Figure 4 : identification des parcelles agricoles (Corine Land Cover 2012)

Sur la base du diagnostic agricole et forestier de GPS&O, nous considérons pour l'année de référence 2017, la répartition des pratiques agricoles suivantes :

- Conventuelles : 89%
- Techniques Culturelles Simplifiées : 11%

Les résultats issus de la simulation *ClimAgri* réalisée par Agrosolutions donnent le stockage additionnel annuel dans les sols et la biomasse aérienne (forestière et agricole) :

¹ Diagnostic et stratégie agricole et forestière du territoire de GPS&O, 2018

Tableau 2 : Séquestration de carbone additionnelle

	Mt eq. CO2/an	Mt C/an
Sols	0.00125	0.00034
Cultures annuelles	0.00028	0.00008
Arboriculture	0.00016	0.00004
Viticulture	0.00000	0.00000
Prairies >30ans (hors prairie naturelle peu productives, parcours, alpages)	0.00000	0.00000
Prairies <30ans	0.00067	0.00018
Pelouse d'altitudes (prairie naturelle peu productives, parcours, alpages)	0.00000	0.00000
Forêt	0.00000	0.00000
Haies Agro-foresterie	0.00013	0.00004
CIPAN	0.00000	0.00000
Biomasse aérienne (forêts + haies)	0.06588	0.01797
Forêt	0.06477	0.01766
Haies et Agro-foresterie	0.00111	0.00030
Total	0.06713	0.01831

Plus de 96% de la séquestration annuelle du territoire est assurée par la biomasse aérienne des forêts. Ce bilan permet de conforter l'enjeu majeur du territoire de sanctuarisation des espaces forestiers. Il est donc intéressant d'évaluer les impacts des changements d'affectation des terres qui ont eu lieu depuis 1990.

L'IMPACT DU CHANGEMENT D'AFFECTATION DES TERRES

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) affirme dans son mémento aux décideurs que les stocks de carbone sont bien plus grands dans le sol que dans la végétation. Ainsi, tout changement d'affectation d'un sol peut fortement modifier ses capacités de puits carbone et d'émissions de carbone. À titre d'exemple, toujours selon le GIEC, des quantités considérables de carbone ont été libérées au XXème siècle par les sols en raison du déboisement. Par le labourage, la décomposition de la matière organique des sols est accélérée en produisant du gaz carbonique atmosphérique (relargage). En contrepartie, l'activité bactériologique et racinaire du sol, ainsi que les apports agronomiques de matière organique (épandage), permettent de reconstituer progressivement le stock de matière organique stable des sols.

Pour identifier les changements d'affectation des terres, nous nous appuyons sur la base de données *Corine Land Cover* sur les années 1990, 2000, 2006 et 2012. Les changements d'affectation des terres concernent environ 2 278 hectares entre 1990 et 2012, ce qui correspond à environ à 4,5% de la superficie du territoire. Ces changements sont répartis selon la chronologie suivante :

- 1 368 hectares entre 1990 et 2000,
- 462 hectares entre 2000 et 2006,
- 448 hectares entre 2006 et 2012.

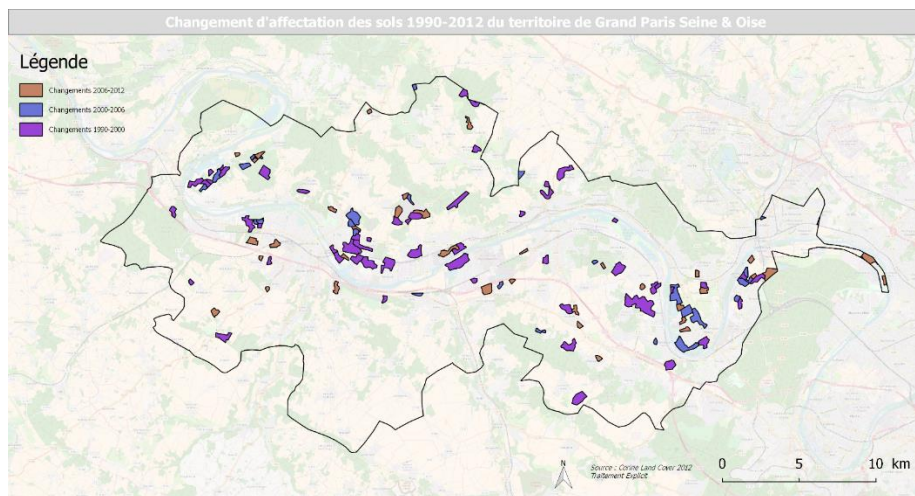


Figure 5 : changement d'affectation des sols entre 1990 et 2012 (Source Corine Land Cover)

L'extension urbaine au détriment des espaces naturels et agricoles a un impact direct négatif car il induit un relargage direct de carbone et réduit le potentiel de séquestration nette de carbone du territoire. Pour rappel, la végétation joue un rôle important de consommation de CO₂ atmosphérique lors de son processus de développement photosynthétique. Les changements d'affectation des terres forestières et agricoles au profit de zones urbaines bâties concernent respectivement environ 165 et 450 hectares entre 1990 et 2012. Cette extension urbaine concerne ainsi au total environ 615 hectares sur l'ensemble de la période de 22 ans, ce qui représente une surface relativement d'environ 1,2% de la superficie du territoire.

Tableau 3 : Changement d'affectation des sols entre 1990 et 2012 (Source Corine Land Cover)

	Surfa ce (ha)	Proportion de la superficie du territoire
Total espaces agricoles -> zones artificialisées	450	0.9%
Total espaces forestiers -> zones artificialisées	165	0.3%
Total espaces agricoles ou forestiers - > zones artificialisées	615	1.2%
Total des changements d'affectation des terres entre 1990 et 2012	2 278	4.5%

Le potentiel de séquestration carbone perdu par un changement d'affectation des sols défavorable entre 1990 et 2012 est d'environ 9 500 tCO₂/an.

Tableau 4 : Déstockage annuel par le changement d'affectation des terres

Déstockage annuel par le changement d'affectation des terres	Mt eq. CO ₂ /an	Mt C/an
Forêt->Terre agricole	-0.000187407	-5.11111E-05
Forêt->Surface artificialisée imperméable	-0.002938224	-0.000801334
Forêt->Surface artificialisée perméable	-0.000918714	-0.000250558
Terre agricole->Surface artificialisée perméable	-0.001363166	-0.000371772
Terre agricole->Surface artificialisée imperméable	-0.00327776	-0.000893935
Prairie->Terre Agricole	-0.001024287	-0.000279351
Terre agricole->Prairie	0.000250688	6.83693E-05
TOTAL	-0.0095	-0.0026

LE DESTOCKAGE CARBONE PAR LA CONSOMMATION DE BOIS-ENERGIE

Il est intéressant de mettre en perspective la séquestration annuelle de CO₂ au regard du déstockage carbone engendré par la consommation locale de biomasse par l'usage énergétique. Cette section présente ainsi l'impact carbone du niveau d'exploitation actuel de la forêt à l'usage bois énergie.

Selon les résultats issus de la simulation ClimAgri, la consommation de bois-énergie a généré un déstockage d'environ 14,2 kteqCO₂/an, soit près de 20% de la séquestration annuelle estimée dans le sol et la biosphère. Nous pouvons donc ainsi considérer que le niveau

d'exploitation actuel de la forêt est acceptable au regard du cycle du carbone naturel sur le territoire.

LA SEQUESTRATION CARBONE DE LA NATURE EN VILLE

Les surfaces vertes urbaines sur le territoire occupent 252 Ha selon les données de *Corine Land Cover* pour l'année 2012. Le stockage de carbone dans ces zones est évalué à 0,6 kteqCO₂/an, sur la base d'hypothèses provenant d'une étude sur l'empreinte carbone de la gestion des gazons menée par la Société Française des Gazons en collaboration avec l'INRA Poitou-Charentes. Pour cette évaluation, nous n'avons pas considéré le stockage de CO₂ lié aux arbres plantés en ville. La séquestration carbone de la nature en ville est donc particulièrement faible par rapport à celle assurée par les espaces forestiers.

LES IMPACTS DE LA SUBSTITUTION ENERGIE ET MATERIAUX BIOSOURCES

L'usage de matériaux biosourcés pour la construction (isolation, parement, ossature, etc.) ou la production énergétique (chauffage) est encouragé car il constitue une ressource renouvelable et locale. Les effets de substitution induits par le recours aux produits et aux énergies biosourcés sont valorisés grâce aux ordres de grandeur suivants, données par l'ADEME :

- 1,1 teqCO₂/m³ de produits bois finis pour les effets dits de « substitution matériau » ;
- 0,34 teqCO₂ évitées par m³ de bois énergie brûlé par les ménages (« substitution énergie ») ;
- 265,4 teqCO₂ évitées / GWh de chaleur produite, dans les secteurs industriels, collectifs et tertiaires (« substitution énergie ») ;
- 403,2 teqCO₂ évitées / GWh d'électricité fournie au réseau à partir de biomasse solide (« substitution énergie »).

Ainsi, en reprenant les récoltes de bois d'œuvre et bois énergie du territoire estimées à partir des données d'exploitation du diagnostic forestier de GPS&O (i.e. respectivement 5 500 m³ ronds et 19 000 m³ ronds), **la substitution matériau et énergie biosourcés permet d'éviter l'émission de 12 510 t CO₂/an.**

Tableau 5 : Effets de substitution matériaux et énergies biosourcés

	Mt eq. CO ₂ /an	Mt C/an
Substitution matériau	0.0061	0.0017
Substitution énergie	0.0065	0.0017
TOTAL	0.0012	0.0034

BILAN DE LA SEQUESTRATION CARBONE ANNUELLE SUR LE TERRITOIRE

Sur le territoire, le stockage dans la biomasse aérienne est principalement assuré par les espaces forestiers. **Le stockage net annuel de carbone est ainsi évalué à 52,7 kteqCO₂/an**, avec la répartition suivante :

- Stockage dans le sol : 1,25 kteqCO₂ / an,
- Stockage dans la biomasse aérienne : 65,88 kteqCO₂ / an,
- Déstockage annuel par prélèvement de bois : -14,2 kteqCO₂ / an,
- Déstockage annuel par le changement d'affectation des terres : -9,5 kteqCO₂ / an,
- Emissions évitées par la substitution matériaux et énergies biosourcés : 12,5 kteqCO₂ / an.

Ce stockage représente 3% des émissions totales de gaz à effet de serre du territoire (1 600 000 teqCO₂/an d'après le diagnostic GES du territoire).

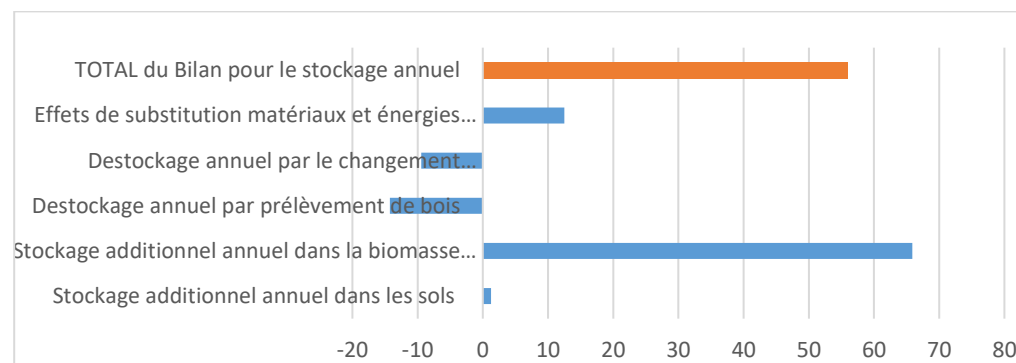


Figure 6 : Séquestration nette annuelle de CO₂

REMARQUES ET LIMITES DE LA METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA SEQUESTRATION CARBONE

La méthodologie d'évaluation de séquestration nette de carbone s'appuie principalement sur l'outil ClimAgri (méthode ADEME). La méthode utilisée présente un certain nombre de limites. Tout d'abord, la limite la plus importante provient du faible nombre de facteurs pris en considération dans les estimations. Plusieurs autres paramètres peuvent influencer la quantité de carbone stockée par la forêt ou la prairie permanente, comme par exemple :

- Les conditions climatiques : suivant les conditions climatiques de l'année écoulée (ensoleillement, pluviosité, vent), les quantités de carbone stockées ne seront pas les mêmes.
- L'historique et l'état initial des sols : les utilisations antérieures du sol ont une importance dans la capacité d'absorption du CO₂. Par exemple, si un sol servait à la culture et qu'il a été transformé en prairie, il aura la capacité d'absorber annuellement plus de carbone par hectare. A l'inverse, si un sol était une prairie et qu'elle a été transformée en culture, la capacité d'absorption en carbone sera plus faible que précédemment.
- La diversité des essences : certaines essences absorbent plus de carbone que d'autres. La diversité des forêts n'a été que très peu prise en compte, en ne faisant qu'une estimation moyenne de la masse de bois contenue par m³ entre les résineux et les feuillus.
- Une classification trop faible : Plusieurs classes absorbant du CO₂ ont été occultées telles que les milieux à végétation herbacée et clairssemée, les arbres plantés en ville, etc. Elles pourraient être

intégrées pour un calcul plus précis, même si leur contribution serait probablement faible.

DEFINITION DES PISTES D'ACTIONS

Afin d'identifier les pistes d'actions permettant de développer le potentiel de stockage du CO₂ sur le territoire, cette partie dissocie :

- La séquestration « naturelle », associée principalement à l'évolution des pratiques agricoles, forestière et constructives,
- La séquestration « industrielle », associée à l'utilisation du CO₂ en tant que facteur de production d'une activité économique (valorisation chimique, biologique, etc.).

1. Développement de la séquestration naturelle

Plusieurs solutions sont identifiées par l'ADEME et l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) pour renforcer le stockage du carbone dans les sols et la biomasse :

- En ce qui concerne l'usage des sols : développer l'agroforesterie en boisant des terres cultivées, convertir en prairies permanentes des terres labourées, allonger la durée des prairies temporaires, planter des haies, enherber les inter-rangs dans les vignes et les vergers. Selon le rapport sur l'agroforesterie rédigé par l'INRA, la gestion des prairies et les terres arables en agroforesterie permettrait d'accroître significativement le taux de stockage de carbone jusqu'à 2 tC/ha/an. De plus, les arbres en agroforesterie se distinguent par un enracinement plus profond et une croissance plus

rapide et donc une production de biomasse annuelle plus importante.

- En ce qui concerne les pratiques de productions agricoles : proscrire la jachère nue, pratiquer l'engrais vert entre les cultures, privilégier les enfouissements de résidus de culture apportant plus de carbone au sol (céréales) et le non-labour ou le semis sous couverture végétale...² Par ailleurs, le changement d'alimentation des bovins (ex : graines de lin), peut avoir un impact positif sur la réduction des émissions méthanogènes du bétail.
- En ce qui concerne la forêt : restaurer les forêts dégradées et mettre en œuvre une sylviculture efficace qui raisonne au mieux le choix d'espèces adaptées aux nouvelles conditions climatiques qui privilégie les essences produisant plus de biomasse (bois, feuilles) et qui préserve la fertilité des sols forestiers.

L'INRA a lancé l'initiative nationale « 4 pour 1000 » qui propose d'améliorer la teneur en matières organiques et d'encourager la séquestration de carbone dans les sols, par la mise en œuvre de pratiques agricoles et forestières. L'objectif de ce programme est d'augmenter chaque année le stock de carbone des sols de 4 pour 1000 dans les 40 premiers centimètres du sol afin de stopper l'augmentation actuelle de la concentration atmosphérique de CO₂, sous condition d'arrêter également la déforestation. Les 5 pratiques à développer pour la gestion des sols et l'agroécologie sont ainsi recommandées :

- Éviter de laisser le sol à nu pour limiter les pertes de carbone,
- Restaurer les cultures, les pâturages et les forêts dégradées,

- Planter arbres et légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique dans le sol,
- Nourrir le sol de fumiers et de composts,
- Conserver et collecter l'eau au pied des plantes pour favoriser la croissance végétale.

Au regard des enjeux qui ressortent du diagnostic, les actions d'accentuation de la séquestration naturelle de CO₂ sur le territoire de GPS&O pourront s'articuler autour des axes 3 stratégiques suivants :

1. La préservation et la gestion des espaces forestiers
2. Le changement de pratiques agricoles
3. La promotion des produits biosourcés (bois énergie et bois d'œuvre)

L'atelier de concertation du 1^{er} juin 2018 avec les acteurs forestiers et agricoles du territoire a permis de dresser des propositions de pistes d'actions afin de maintenir le stockage de carbone dans la biomasse forestière et l'augmenter dans la biomasse agricole :

² Communication de la CAER L'Agriculture, l'alimentation, la forêt et les sols face au défi du changement climatique – 10 décembre 2015 29/33

Axes	Enjeux	Actions	Freins	Opportunités
Axe 1 : préservation et gestion des espaces forestiers	Augmenter l'accroissement biologique des forêts non exploitées par la gestion dynamique	- Favoriser la communication entre élus, politiques et propriétaires - Promouvoir / communiquer sur les formations existantes - S'appuyer sur les intervenants des communes forestières	Morcellement et accessibilité des parcelles Mobilisation des élus Enjeux sociaux / manque de compréhension de ces pratiques Manque de connaissance	Des formations existent sur la gestion dynamique existent
	Diversifier les essences plantées	- Structurer la filière pour constituer une chaîne de valorisation complète - Développer les usages de bois	Difficulté pour trouver des marchés pour les nouvelles essences atypiques	Favoriser les essences nouvelles pour le bois-construction Développer une R&D sur les essences du sud
	Développer de nouveaux itinéraires techniques de gestion	- Former les exploitants/propriétaires forestiers	Dégradation des sols (compactage)	Réaliser au sein des parcelles des dessertes de circulation (cloisonnement)
Axe 2 : Le changement de pratiques agricoles	Développer l'agroforesterie	- Mettre en place une bourse d'échange crédit carbone / des projets de compensation avec des entreprises de la région finançant la plantation d'éléments paysagers ou d'arbres en agroforesterie - Informer les agriculteurs via des plaquettes de communication sur les aspects économiques, techniques et juridiques.	Coûts Incertitudes sur le retour sur investissement dans le cas de fermage et de zones soumises à pression foncière	Productivité à condition entretien
	Diminuer le travail du sol et développer l'agriculture de conservation	- Développer un accompagnement technique spécifique - Soutenir l'acquisition de références	Un bouleversement des pratiques : manque de références et accompagnement technique, en particulier sur des systèmes sans glyphosate	Améliore l'adaptation au CC et réduit la consommation en eau Limiter le ruissellement
Axe 3 La promotion des produits biosourcés	Sécuriser et développer les débouchés en bois d'œuvre (stockage de carbone)	- Regroupement des parcelles et des productions	Infrastructures routières Manque d'unités de transformation. Absence de scieries en IdF et absence de	Augmentation de la demande en construction/rénovation bois en Ile de France

			structuration de filières bois d'œuvre (et bois énergie) au niveau local Manque de références d'utilisation du bois d'œuvre, des essences locales dans la construction Manque entreprises de travaux entretien des forêts Coût/capacité de production	Possibilité de diversification en essence et en sylviculture
	Développer les filières biomatériaux pour la construction	- Accompagnement et formation - Etude de la faisabilité et des investissements à mener pour le développement d'une filière chanvre en lien avec Gâtichanvre (Essonne)	Des cultures pérennes (miscanthus) Des filières en cours de structuration	Création d'emploi local Dispositifs d'aides : DIVAIR volet 2 (chanvre et lin), PCAE Gâtichanvre, une usine de transformation du chanvre dans l'Essonne en recherche de surfaces

2. Développement de la séquestration industrielle

Le territoire de GSPS&O est un territoire industriel. Plusieurs de ces industries émettent des quantités importantes de GES et de polluants atmosphériques et doivent ainsi être répertoriées sur le Registre des Emissions Polluantes (IREP). Le territoire compte 7 industries déclarées sur l'IREP (700 ktCO₂eq au total). Ces dernières sont résumées dans le tableau et la carte ci-dessous.

Tableau 6 : Liste des industries fortement émettrices de CO2

Nom de l'industrie	Emissions en t CO2.
AZALYS	138 000
Usine de Flins	55 300
Ciments Calcia usine de Gargenville	228 000
SARP Industries	96 100
SOMEC	19 100
PSA PEUGEOT CITROËN - Site de POISSY	36 600
Centre de Production Thermique EDF de PORCHEVILLE	127 000

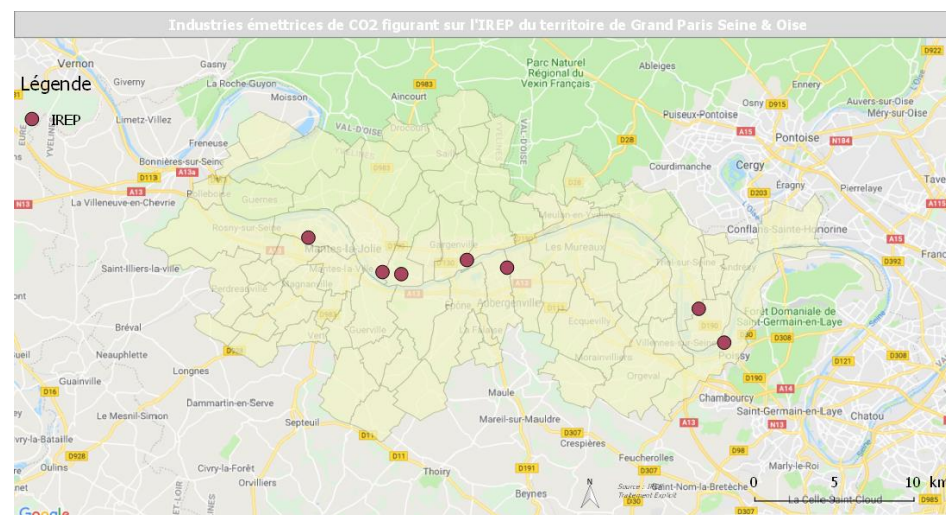


Figure 7 : IREP émettrices de CO₂ sur le territoire (IREP 2016, Traitement EXPLICIT)

Il peut être intéressant, dans un premier temps, de cibler des actions de sobriété, d'efficacité énergétique et de déploiement des énergies renouvelables sur ces industries afin de diminuer les émissions de GES.

Il existe aussi, aujourd'hui, plusieurs filières industrielles ou expérimentales visant à valoriser le CO₂ dans leur procédé et ainsi à le séquestrer de manière industrielle. Quelques-unes de ces filières (pouvant présenter un intérêt sur le territoire) sont décrites ci-dessous en spécifiant lorsque cela est possible : les potentiels de séquestration, les principaux éléments financiers, le niveau de maturité de la technologie, les freins associés et des exemples de mise en œuvre.

Les principales filières de valorisation de CO₂ sont aujourd'hui assurées par transformation biologique, chimique et sans transformation. Les filières de valorisation sont à distinguer des

filières de captage et stockage (Biochar, fertilisation des océans, capture directe et stockage en milieu non confiné, ...) puisqu'elles considèrent le CO₂ comme un déchet contrairement à la valorisation qui le considère comme une ressource.

Il est cependant à noter que les demandes industrielles mondiales de CO₂ sont aujourd'hui relativement faibles (18MtCO₂/an en 2010 soit 0,06% des émissions de CO₂ anthropiques et 10% de la quantité totale de CO₂ valorisée).

Tableau 7 : Demandes mondiales en CO₂ actuelles et à horizon 2020 pour différentes application industrielles (Techniques de l'ingénieur)

Application	Demande actuelle (Mt/an)	Demande à l'horizon 2020 (Mt/an)
Industrie agro-alimentaire	~8,5	~15
Gazéification des boissons	~8	~14
Traitement de l'eau	1 à 5	1 à 5
Extraction de la caféine	–	1 à 5
CO ₂ supercritique	< 1	< 1
Gaz réfrigérant	< 1	< 1
Inertage au CO ₂	< 1	< 1
Viticulture	< 1	< 1
Soudage	< 1	< 1
Industrie des pneumatiques	< 1	< 1

Valorisation sans transformation

Le CO₂ dispose de propriétés calorifiques, gazeuses, d'inertage et de solvant qui peuvent être utilisées directement sans transformation.

Le CO₂ supercritique (état à partir de 74 bars et 31°C) est par exemple un fluide très peu visqueux avec une grande capacité de diffusion et une tension superficielle et densité remarquable permettant son utilisation dans plus de 300 usines dans le monde. Le CO₂ supercritique est notamment utilisé pour des **procédés d'extraction** (extraction de la caféine du café par exemple), **la synthèse organique, la stérilisation, la fabrication de poudres, ...**

Le CO₂ peut aussi être utilisé comme solvant avec des applications dans le nettoyage de précision (médical et autre) et le nettoyage des puits de forage. DyeCoo, une société néerlandaise utilise le CO₂ sous forme liquide pour la teinture de textiles à grande échelle, n'utilisant ainsi pas d'eau.

Le CO₂ peut aussi être utilisé pour ses propriétés thermiques. Inerte, stable et non corrosif il peut être utilisé comme **fluide réfrigérant** en remplace ainsi d'autres gaz comme le HFC et les CFC qui ont un potentiel de réchauffement global important.

Ses propriétés gazeuses lui permettent d'être utilisé pour la **gazéification des boissons** (utilisation actuelle estimée à 8Mt/an dans le monde) mais aussi dans des **procédés de moussage** (synthèse polystyrène) et de **séchage** (exemple Australien de RWE permettant des procédés plus efficaces que du séchage à l'air). La dissolution du CO₂ dans l'eau permet aussi de neutraliser des effluents basiques notamment dans le secteur du **traitement de l'eau**. Il est aussi utilisé pour ses propriétés minérales dans la **reminéralisation de l'eau** (rééquilibrage calco-carbonique de l'eau issu d'un traitement de dessalement).

Le CO₂ présente aussi des propriétés permettant d'abaisser la viscosité de certains fluides (pétrole, gaz) et de faciliter leur extraction du sol. Ces techniques ne seront pas détaillées dans ce document qui n'a pas vocation à communiquer sur les techniques d'extraction de produits pétroliers et de gaz du sol et qui semblent avoir peu d'intérêt pour le territoire. Cependant le CO₂ permet aussi, grâce à ses propriétés thermiques, **la récupération assistée de la chaleur en géothermie profonde (température supérieure à 150°C)**. En effet au-delà de 90°C, la chaleur géothermique peut être utilisée dans les procédés industriels (cogénération, séchage,...). Le CO₂ supercritique a l'avantage d'avoir une capacité de récupération de chaleur supérieure à l'eau. Cette technologie est en phase de recherche et développement et pourrait atteindre le stade industriel en 2030 et permettrait ainsi de valoriser 5 à 30 MtCO₂/an (Techniques de l'Ingénieur). Les coûts d'investissement seraient de 3,1M€/MW d'électricité installée tandis que les coûts opérationnels seraient de l'ordre de 50€/MWh (Technique de l'Ingénieur).

Tableau 8 : Exemples de projets de récupération de chaleur géothermique

Projet	Caractéristiques	Résultats/prévisions
Projet d'Ogachi HDR (Japon) [62]	Les puits du site d'Ogachi exploités depuis 1982 ont pour caractéristiques une haute température et faible productivité À partir de 2010, des recherches sont menées sur l'injection d'un mélange de saumure et de CO ₂ pour récupérer la chaleur géothermique sous des conditions de pression et température de 100 bars et 210 °C respectivement	Les objectifs du projet sont l'obtention de données sur la performance de la géothermie profonde avec du CO ₂ et la réalisation d'études de modélisation des interactions chimiques entre le mélange de CO ₂ et saumure et les roches de la formation géothermique
Projet de Green Fire Energy et Enhanced Oil Resources (États-Unis)	Projet de récupération de la chaleur géothermique avec du CO ₂ supercritique ayant reçu une subvention du DOE de 10 millions de dollars [63]. Le CO ₂ utilisé est obtenu du réservoir naturel de St. Johns-Springerville Dome, au sein duquel 450 GtCO ₂ sont potentiellement récupérables de gisements peu profonds [56]	Le but de ce projet est la construction d'une unité de 1 à 2 MW nécessitant ~141 600 m ³ de CO ₂ à 95 % de pureté. Viendront ensuite d'autres unités pour un total de 50 MW... sur un potentiel total de 800 MW (et ~14 158 423 m ³ de CO ₂ par jour [55])
Geodynamics Ltd (Australie)	Geodynamics Ltd a mis en service en 2013 l'unité pilote de 1 MWe de l'Habanero, la première unité productrice d'énergie par EGS en Australie [64]. La réalisation de tests d'utilisation du CO ₂ en stade supercritique comme fluide de travail est prévue	Il est attendu une production de 500 MW en 2018, représentant un stockage potentiel de 4,4 Mt de CO ₂ par an [25]
Projet de Symyx Technologies Inc. (États-Unis)	Projet de recherche (4 ans – coût total de 4 millions de dollars) pour développer un modèle géochimique capable de simuler le fonctionnement d'une opération de géothermie profonde en utilisant le CO ₂ supercritique comme fluide de travail	Étude des interactions du CO ₂ supercritique avec de l'eau et certains minéraux présents dans les formations géothermiques [65]

Valorisation Biologique du CO₂

La valorisation biologique du CO₂ passe notamment par la culture de microalgues qui utilisent la photosynthèse pour transformer le carbone minéral en carbone organique (biomasse). Plusieurs dispositifs de cultures sont aujourd'hui en phase de développement (raceways, photobioréacteurs). Ces microalgues peuvent être utilisées dans plusieurs filières. Ces dernières sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Exemple des applications et filières des algues (Techniques de l'ingénieur)

Applications	Utilisation	Maturité de la filière	Développement	Volume
Alimentation humaine et animale (exemple : spiruline)	Utilisation des huiles et des protéines extraites. Malgré une mauvaise assimilation des microalgues fraîches par les organismes, la demande devrait croître fortement au cours des prochaines décennies	++	++	++
Utilisations industrielles (ex : en pharmacie, en compléments alimentaires...)	Il s'agit d'une filière existante et déjà bien développée. L'utilisation de microalgues en colorants est un exemple via le β-carotène (margarine, autobronzant, provitamine A, astaxanthine) et la phycocyanine (pigment bleu, usage cosmétique et alimentaire). Les microalgues peuvent aussi être exploitées en tant que sources de vitamines (A, B ₁ , B ₆ , D, E et K) et en imperméabilisants	+++	+	+
Traitement des eaux usées (ex : pollution en azote et phosphore...)	Les microalgues peuvent servir dans le traitement des eaux usées d'origine domestique ou agricole dans le cadre de lagunage	(R et D)	++	+++
Production de biogaz	Les microalgues peuvent servir de support à la filière de fermentation (méthanisation). Le biogaz généré (CH ₄) peut être exploité pour produire de l'électricité par cogénération	+	+++	++
Production d'algocarburants	Les microalgues peuvent servir en tant que précurseurs de biodiesel (algues à fort taux de lipides) et de bioéthanol (algues à fort taux de sucres) : on parle alors de biocarburants de 3 ^e génération. Le potentiel de développement du marché des algocarburants est très élevé à ce jour, bien que non mature	(R et D)	++++	++++

Tableau 10 : Exemple de culture de microalgues en bassin ouvert
(Techniques de l'ingénieur)

Projet/unité	Caractéristiques	Résultats/prévisions
Bassin ouvert Pilote – Seambiotic à Ashkelon (Israël) [13][87]	Seambiotic commercialise des acides gras Oméga 3. Un pilote en bassins ouverts à l'échelle préindustrielle utilise du CO ₂ issu des cheminées de combustion à Ashkelon. Les rejets de CO ₂ de la cheminée sont évalués à 431 t/h. Les gaz utilisés sont préalablement traités avec l'élimination des composés soufrés ; ils contiennent entre 56 et 70 ppm de soufre (contre 500 avant traitement) et 13,3 % de CO ₂	Ce pilote utilise des souches auto-sélectives au contact des gaz de fumées et en fonction de la saison. La productivité moyenne obtenue est de 20 g/m ² /jour. Elle est variable en fonction des saisons. La récolte est ensuite réalisée par floculation et filtration. Ces procédés sont moins énergivores que la centrifugation. Les algues sont ensuite congelées et envoyées par bateaux aux États-Unis. La société Inventure se charge d'extraire les lipides et la cellulose pour la production d'algocarburant
Bassin ouvert Projet – SALI-NALGUE Compagnie du Vent et partenaires (France) [88][89][90]	Lancé depuis 2010 il a pour objets l'étude en milieu ouvert de culture d'algues (<i>Dunaliella salina</i>) sur des salines inexploitées et le bioraffinage pour des marchés de masse (énergie et/ou alimentation animale). Une première phase pilote, étendue sur 1 000 m ² , est en cours de finition. Le passage à une échelle industrielle est envisageable grâce à la proximité d'une cimenterie émettrice de CO ₂ Ce projet s'associe à celui de l'écosite de Méze, zone pour laquelle des bassins de lagunage destinés à la culture d'algues sont en cours de réflexion	Les rendements de transfert gaz/liquide obtenus sont très bons (s'approchant des 100 %) grâce à des technologies très performantes. La mise en place d'un démonstrateur (1 ha) en 2014, pour une durée maximale de deux ans, permettra d'identifier les molécules intéressantes ainsi que de valider la faisabilité technique et la rentabilité économique. Il s'agit d'un projet complet puisqu'il associe une étude des impacts environnementaux via la réalisation d'une analyse de cycle de vie (ACV), une réduction maximale des coûts et la valorisation intégrale de la microalgue
Bioréacteurs Projet – Dow Chemicals et Algenol Bio-fuels (États-Unis)	Création en 2011 d'une bioraffinerie pour une mise en service en 2013 Ce projet compte près de 3 100 photobioréacteurs horizontaux répartis sur 15 hectares afin de produire de l'éthanol	Le résultat attendu est de 380 000 litres d'éthanol produits par an avec un prix qui ne devrait pas dépasser les 1,30 € par litre. Environ 734 tCO ₂ seraient nécessaires pour le bon fonctionnement de cette usine
Bioréacteurs Pilote – SOLIX (États-Unis) [90]	SOLIX possède à Durango dans le Colorado une unité pilote pour la production de biocarburants à partir de fumées de combustion d'industries depuis 2009. SOLIX récupère les eaux usées d'un site d'extraction de méthane et le CO ₂ est issu de la production d'amines	L'usine pilote produirait près de 5 600 litres d'algues par an. En août 2012, SOLIX a annoncé la construction d'une usine pour commercialiser de l'algocarburant et de la nourriture animale. L'entreprise américaine souhaite étendre le processus à plus grande échelle et ainsi améliorer la productivité et la rentabilité
Bioréacteurs Algotech (Israël) [87]	Dans le désert du Negev, Algotech utilise des photobioréacteurs tubulaires solaires pour lesquels la productivité maximale serait de 1,6 g/L/jour	La méthode des photobioréacteurs plats à orientation inclinée est aussi présente en Israël pour la culture de l'algue <i>Spirulina platensis</i> , avec une productivité maximale de 4,3 g/L/jour
Bioréacteurs Projet – SymBio2-BOX (France)	Le groupe Sèche Environnement en partenariat avec le laboratoire GEPEA s'intéresse à la culture de ces organismes dans des photobioréacteurs en symbiose avec une façade. Ce concept est nommé « biofaçade ». Le CO ₂ utilisé serait issu des fumées des usines d'incinération d'ordures ménagères	L'investissement se chiffre à 2 000 €/m ² de biofaçade. La production attendue est estimée entre 3 et 4 kg de biomasse sèche algale par mètre de façade par an. D'après les différentes études menées, l'isolation des bâtiments serait fortement améliorée, diminuant de 75 % les besoins en chaleur en hiver. Lors de la période estivale, le bâtiment serait aussi isolé des fortes chaleurs [91][92][71]

Le CO₂ peut aussi être utilisé dans des procédés de biocatalyse afin de catalyser les réactions chimiques en imitant les processus naturels. Cela permettrait notamment de produire des molécules à haute valeur ajoutée (produits pharmaceutiques), de dihydrogène, et de biocarburants.

Valorisation Chimique du CO₂

La **minéralisation du CO₂** consiste en une réaction entre le CO₂ et les oxydes de calcium ou de magnésium. Cette réaction permet le piégeage durable du CO₂ et la production de chaleur. Cette technologie est au stade pilote. La minéralisation peut avoir lieu in-situ (le CO₂ est injecté dans des formations géologiques) et s'apparente alors au stockage souterrain de CO₂. La minéralisation peut aussi servir à améliorer le bilan carbone de la production de certains matériaux comme le ciment, la soude ou le bicarbonate de sodium en piégeant le CO₂ à l'intérieur. En France, il existe des projets de recherche multipartenaires. Par exemple, le projet d'écoconstruction SAPICO₂ vise à créer des éco matériaux en utilisant un mélange de ciment et de carbonate (lui-même produit à partir du CO₂) et ainsi réduire la production de déchets et la réutilisation de CO₂ émis par des petites et moyennes entreprises (Techniques de l'Ingénieur).

Le **reformage sec du méthane** est une réaction permettant de transformer le CO₂ et le méthane en gaz de synthèse (mélange de dihydrogène et monoxyde de carbone) permettant de synthétiser du méthanol, de l'hydrogène, des hydrocarbures,... C'est une technologie au stade de recherche et développement mais pourrait rapidement atteindre un stade opérationnel. Elle existe déjà au stade industriel lorsqu'elle est combinée avec un procédé de reformage avec de l'eau.

L'**électrolyse du CO₂ et de l'eau** permet de produire du monoxyde de carbone et du dihydrogène eux-mêmes transformables en hydrocarbures de synthèse (par exemple du méthane). D'après l'ADEME, les techniques d'électrolyse sont à envisager après 2030. Son intérêt est de produire de l'énergie d'origine renouvelable.

La **méthanation** est une réaction permettant de transformer le CO₂ et le dihydrogène en produits valorisables comme le méthanol (additif dans les carburants et industrie chimique), l'acide acétique, le

méthane (ce procédé se développe notamment comme voie de **stockage énergétique**) et en alcools (éthanol) et hydrocarbures.

Tableau 11 : Exemples d'unités/ Projet de méthanation (Techniques de l'ingénieur)

Méthanol : projet VITESSE2 (France)	Ce projet, lancé en 2010, regroupe plusieurs partenaires tels qu'AREVA, le CNRS (LMSPC, LRGP, ENSIC), le CEA, EDF, Hélium, Air Liquide, Rhodia et Veolia [61]. Il a nécessité un investissement de 3,9 millions d'euros [100]	L'objectif du projet est de développer un procédé d'hydrogénation du CO ₂ émis par des industriels pour produire du méthanol La production flexible d'hydrogène par électrolyse est envisagée [85]
Carburant : unité de recherche d'Air Fuel Synthesis (Grande-Bretagne)	L'entreprise britannique Air Fuel Synthesis (AFS) a développé une unité de recherche pour produire des carburants synthétiques tels que le méthane à partir de CO ₂ capté directement et de H ₂ obtenu par électrolyse de l'eau AFS affirme qu'il s'agit d'un carburant directement utilisable dans les moteurs à explosion conventionnels	Cette unité a été mise en service en 2012 avec une production de 5 à 10 litres d'hydrocarbures par jour [101]. Le but est de mettre en place une usine commerciale en 2017-2018 avec une capacité de production de 1 à 10 t d'hydrocarbures/j [101]
Méthane : unité pilote de recherche de ZSW à Stuttgart (Allemagne) – Projet P2G [102]	Le Center for Solar Energy and Hydrogen Research (ZSW) a mis en route fin 2012 une centrale power to gas avec une unité de 25 kW construite en 2009 et une unité de 250 kW Elle sert de référence pour les usines industrielles en projet de 1 à 20 MW. Elle a nécessité 2,5 M€ pour l'installation du pilote auxquels s'ajoutent 1 M€ de frais de recherche sur trois ans Les points forts de cette unité pilote sont : – une capacité pour opérer en discontinu et qui permet de gérer les fluctuations des apports en énergie – un stockage des énergies renouvelables : les énergies solaire et éolienne sont utilisées pour l'électrolyse de l'eau (production de 50 Nm ³ /h d'hydrogène [103] qui réagit ensuite avec le CO ₂ pour produire environ 12,5 Nm ³ /h de méthane pouvant être stocké [103])	– L'unité de 250 kW produit environ 300 Nm ³ de méthane par jour (= 12,5 Nm ³ /h) Elle fonctionne à une pression inférieure à 10 bar et peut utiliser théoriquement différentes sources de CO ₂ : biogaz brut, CO ₂ issu de la production de bioéthanol, CO ₂ de centrale thermique, CO ₂ de l'industrie chimique... Il est même envisageable d'utiliser l'air ambiant avec cependant un surcoût conséquent lié à la concentration nécessaire de CO ₂ – L'installation pilote de 25 kW a fonctionné avec du CO ₂ (préalablement traité pour enlever le H ₂ S et concentré) d'une installation de biogaz. Les gaz provenant de l'industrie ou d'une centrale thermique doivent eux aussi être prétraités pour éliminer des substances qui impactent le catalyseur [104] [70] [94]

Conclusion

Cet état des lieux permet de prendre connaissance des différentes filières de valorisation qu'il existe aujourd'hui à l'échelle mondiale. Il pourra être intéressant, dans la phase de stratégie territoriale et de plan d'actions, de croiser ces technologies avec les industries de GPS&O. Cela permettra de déterminer quel type de valorisation les industries du territoire pourraient mettre en place.