



Association pour l'innovation et la recherche
au service du climat (AIR Climat)

Plan climat-air-énergie métropolitain (PCAEM)

Séquestration du dioxyde de carbone dans les sols agricoles et forestiers de la métropole Aix-Marseille-Provence



Rapport final
Janvier 2019

Destinataire



Cette étude technique portant sur l'estimation de la séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers sur le territoire de la métropole Aix-Marseille-Provence (AMP) a été menée par AIR Climat avec l'appui du Groupe régional d'experts sur le climat en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur¹ (GREC-SUD) et de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Elle entre dans le cadre du plan climat-air-énergie métropolitain (PCAEM). Ce rapport propose une approche purement technique sur l'estimation de la séquestration du carbone à l'échelle territoriale. Un état des connaissances scientifiques régionales sera présenté dans un prochain cahier thématique du GREC-SUD (parution prévue au 2nd trimestre 2019).

Crédit photo de la couverture : @Daniel Kapikian

¹ www.grec-sud.fr

Sommaire

Contexte général et local	4
1. Le contexte territorial et réglementaire.....	8
2. Le rôle potentiel des sols agricoles et forestiers dans l'atténuation des gaz à effet de serre	9
3. La séquestration du carbone d'un point de vue théorique.....	12
3.1. Le carbone et son cycle	14
3.1.1. Les fonctions de la biomasse.....	15
3.1.2. Les fonctions des matières organiques	16
3.2. État des connaissances générales et verrous associés à la séquestration du carbone.....	16
3.2.1. Différence entre stock et flux.....	16
3.2.2. Les méthodes de gestion des stocks de carbone	17
3.3. Méthodes et outils d'estimation de la séquestration	19
3.3.1. Estimation du stockage et des variations de stock de carbone dans les sols et la biomasse : volet scientifique	19
3.3.2. Les bases de données existantes sur le carbone dans les sols et la biomasse : volet technique.....	20
3.3.3. Les méthodes de cartographie potentielles : volet opérationnel.....	21
3.3.4. Incertitudes et limites associées à la modélisation et aux données disponibles	23
4. Estimation de la séquestration du carbone à l'échelle de la métropole.....	24
4.1. Présentation de l'outil ALDO	24
4.1.1. Calcul des stocks de carbone.....	26
4.1.2. Calcul des flux de carbone	27
4.1.3. Pratiques agricoles	28
4.1.4. Dendrométrie	29
4.2. Estimation de la séquestration du carbone sur la période actuelle récente à l'échelle de la MAMP.....	29
4.2.1. Comparaison des surfaces par occupation des sols entre Corine Land Cover 2012 et l'OCSOL régionale 2014	29
4.2.2. Stocks de carbone de référence estimés par occupation des sols.....	30
4.2.3. Comparaison des stocks estimés par occupation des sols et par réservoir entre CLC 2012 et l'OCSOL 2014	31
4.3. Scénarios prospectifs à horizon 2040.....	33
4.3.1. Trois scénarios basés sur une évolution démographique virtuelle.....	33
4.3.2. Changements d'affectation des sols entre aujourd'hui et 2040 selon les scénarios.....	34
4.3.3. Effets des changements d'affectation sur la séquestration de carbone.....	37
Conclusion et recommandations générales	39

Contexte général et local

Même si les fluctuations climatiques se sont succédé par cycle au cours de l'histoire de la Terre, le réchauffement climatique à l'échelle mondiale amorcé depuis le début de l'ère industrielle est principalement causé par les activités anthropiques (industrie, transport, chauffage...). En effet, l'exploitation des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) contribue à émettre massivement des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, et plus particulièrement dans la troposphère, c'est-à-dire les basses couches atmosphériques situées entre 9 et 15 km d'altitude en fonction de la latitude (épaisseur maximale au niveau de l'équateur). La troposphère est une fine couche de l'atmosphère composée de nombreux gaz, aérosols, poussières en suspension, etc. : diazote, dioxygène, argon, dioxyde de carbone, néon, krypton, méthane, hélium, dioxyde d'azote, ozone... Le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2) ou encore le protoxyde d'azote (N_2O) sont des GES dont l'excès dans l'atmosphère tend à renforcer l'effet de serre qui est un phénomène naturel et donc à augmenter la température de l'atmosphère. Grâce à l'effet de serre (Figure 1), la température sur Terre est de l'ordre de 15°C , propice au développement de la vie sur Terre. Sans cette « couverture chauffante », la température serait voisine de -18°C .

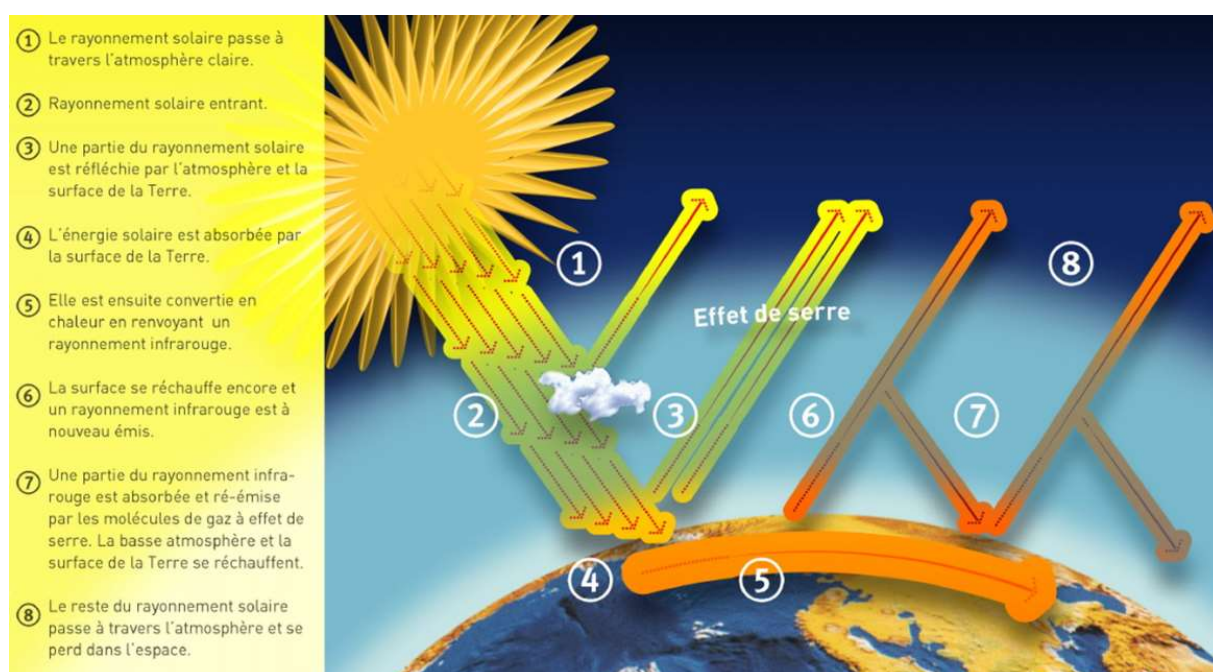


Figure 1. Le principe de l'effet de serre (source : GIEC, 3^{ème} rapport, 2001)

L'évolution du climat dépend ainsi de la composition de l'atmosphère qui varie selon l'activité volcanique, des concentrations de GES... Ces 400 000 dernières années (Figure 2), les concentrations en dioxyde de carbone ont oscillé entre 180 et 300 parties par million (ppm). En 2018, elles dépassaient 410 ppm, soit une hausse d'environ 46 % par rapport au début de l'ère industrielle. En 150 ans, les concentrations ont donc massivement augmenté. De leur côté, les concentrations de méthane ont été multipliées par 2,57. Les tendances climatiques enregistrées depuis 150 ans ne peuvent être expliquées (ou très partiellement) par des causes naturelles. Malgré la baisse de l'activité solaire enregistrée au début des années 2000 et l'absence d'autres facteurs naturels, les températures de l'air ont continué à augmenter par exemple, ce qui témoigne de l'influence des émissions d'origine anthropique. Les projections climatiques du dernier rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC) se basent sur des scénarios socio-économiques (RCP 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5) : en l'absence de politiques d'atténuation à l'échelle mondiale, les concentrations de CO_2 dépasseraient 900 parties par million (ppm) en 2100, soit un taux aux

conséquences encore inconnues tant les bouleversements des écosystèmes marins et terrestres seraient graves.

La communauté scientifique a mis en évidence dès les années 70 le réchauffement climatique et les probables facteurs de l'évolution du climat liée aux activités humaines. La création du GIEC en 1988 et la publication des rapports successifs ont confirmé les effets des émissions de GES de l'échelle globale à régionale. Le 5^{ème} rapport publié en 2013, enrichi depuis par des publications destinées aux décideurs, et le dernier rapport spécial sur les impacts du réchauffement planétaire de 1,5°C permettent de se projeter vers l'avenir en anticipant les changements climatiques qui auront potentiellement des impacts sévères sur les forêts, l'agriculture, les milieux marins, les villes, les territoires montagnards ou encore les ressources en eau, si les émissions de GES ne baissent pas rapidement. Les accords de Paris à l'issue de la COP 21, mais aussi les débats lors des COP 22, 23 et 24, insistent sur ce levier pour protéger la nature et l'homme ces prochaines décennies. Le dernier rapport spécial 1.5°C met en lumière l'effort à fournir à l'échelle mondiale pour éviter de dépasser cette température moyenne globale à partir de laquelle les incidences seront potentiellement irréversibles pour la nature et l'homme. Cela inclut aussi la disparition de certains États insulaires qui seraient submergés sous l'effet de l'élévation du niveau des océans et des mers. Réduire les GES est donc un enjeu fondamental et incontournable à l'échelle planétaire. Toutes les strates territoriales, du décideur au citoyen, sont concernées par le défi climatique. La gouvernance doit intégrer cette dimension pour protéger la population et préserver la richesse de la biodiversité terrestre et marine qui assure des services écosystémiques. Si les scénarios pessimistes (RCP 6.0 et 8.5) se réalisaient, la perte de la biodiversité serait considérable provoquant des déséquilibres que l'homme n'est actuellement pas en mesure de surmonter sans difficultés majeures (conflits, pauvreté, famines, accès à l'eau...).

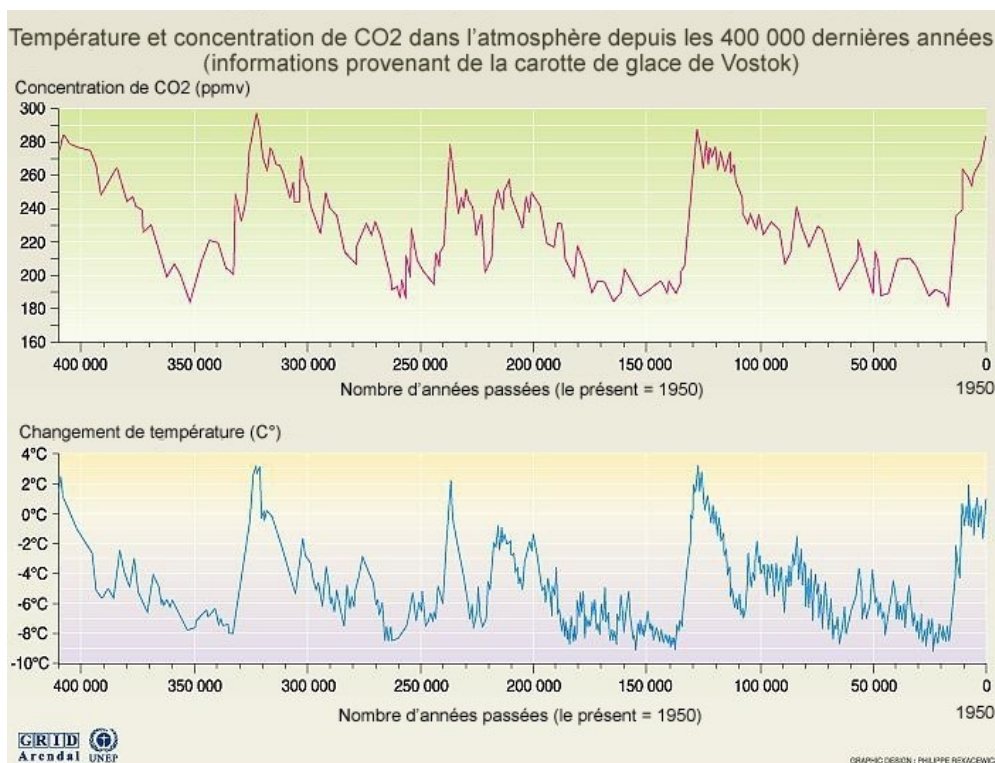


Figure 2. Évolution de la température en fonction des concentrations de dioxyde de carbone ces 400 000 dernières années (source : J.R. Petit, J. Jouzel *et al.*²)

² *Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica*, Nature 399, pp 429-436, 1999

Le renforcement des GES dans l'atmosphère depuis la fin du XIX^{ème} siècle a rompu, à une vitesse très rapide, l'équilibre de la machine thermique terrestre et déséquilibré le rapport entre le rayonnement solaire incident et le rayonnement réémis vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. En d'autres termes, l'atmosphère stocke davantage d'énergie qu'elle n'en perd. Plus l'atmosphère contient de GES, plus les processus de diffusion et d'absorption du rayonnement solaire prennent le pas sur la réflexion, soit la quantité de chaleur renvoyée vers l'espace. Aujourd'hui, un excédent de 4,1 Gt piégé dans l'atmosphère (Figure 3) contribue au réchauffement climatique. Pour atteindre la neutralité carbone, les émissions nettes de carbone doivent être équivalentes au flux net de séquestration de carbone.

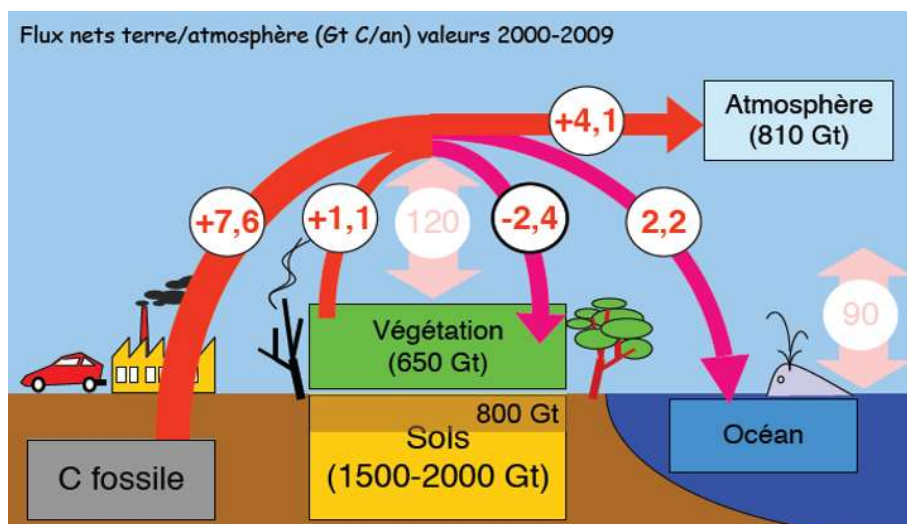


Figure 3. Flux net de séquestration de carbone dans les différentes composantes terrestres
(source : données GIEC 2007 & Global Project 2010)

La température a ainsi globalement augmenté d'environ un degré Celsius depuis le début de l'ère industrielle. Le réchauffement climatique est global, mais il est inégalement réparti sur la planète. Cela se traduit par une hausse plus sévère dans certains secteurs géographiques comme dans les régions polaires ou en montagne par exemple. De manière générale, il en est de même sur les continents et au niveau du bassin méditerranéen, zone à hauts risques dans laquelle la métropole Aix-Marseille-Provence (AMP) se situe dans son intégralité. En région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur, en plaine, la hausse de la température est proche de 1,5°C. Depuis le début des années 80, le réchauffement s'est même accéléré avec une répétition de journées chaudes, d'événements extrêmes comme les périodes de canicules et de sécheresses par exemple. Le climat méditerranéen est caractérisé par des phénomènes violents, mais ces derniers ont tendance à se répéter de manière plus fréquente et à gagner en intensité. À l'échelle de la région et du territoire métropolitain, les simulations des projections climatiques issues des différents modèles climatiques régionaux Euro-Cordex confirment ces tendances, avec une période estivale allongée durant laquelle le nombre de jours de pluie a tendance à diminuer, le cumul des précipitations à baisser, la température maximale à augmenter, le nombre de nuits tropicales à s'accroître, les sols à s'assécher, le risque incendie à progresser... Le bouleversement climatique qui ne se résume pas à l'été modifie la phénologie des plantes. Les arbres et les cultures connaissent en effet une évolution de leur cycle végétatif (débourrement précoce, manque de froid, gel tardif...). Ces modifications concernent aussi bien la forêt que les cultures.

Aujourd'hui, en France, la prise de conscience est collective (État, collectivités territoriales, associations, citoyens...) et la réglementation nationale évolue pour limiter les émissions de gaz à effet de serre (atténuation), renforcer la séquestration de carbone dans les sols et favoriser les actions d'adaptation au changement climatique. La mise en place des plans climat-air-énergie

territoriaux (PCAET) qui ont pris le relais des PCET, est l'une des mesures nationales pour lutter contre le changement climatique, ou du moins d'en limiter les effets. La métropole Aix-Marseille-Provence construit son plan climat-air-énergie métropolitain. La séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers fait partie du volet « atténuation ». En effet, le stockage du carbone est principalement assuré, hors séquestration du carbone en mer, par les sols et la biomasse forestiers, mais aussi les sols et la biomasse agricoles. Renforcer leur potentiel de séquestration permet de compenser les émissions de GES issues des activités anthropiques. Les GES émis par l'agriculture, par exemple, proviennent de la consommation d'énergie (chauffage des serres, consommations des engins agricoles par exemple), des engrais azotés... Transformer l'occupation des sols a une incidence directe sur leur capacité de séquestration du carbone, or les dynamiques territoriales, notamment urbaines et périurbaines, influent sur l'évolution des surfaces. Selon la Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, la surface agricole au sein de l'espace métropolitain est en net recul : -975 ha/an entre 2000 et 2010, -700 ha depuis 2010. Selon un scénario tendanciel (si aucune politique restrictive n'est mise en œuvre), ce recul significatif se poursuivra : 55 000 ha en 2020 contre 34 000 ha en 2050. La pression foncière sur les terres agricoles est donc très forte.

L'évolution des espaces agricoles et forestiers est ainsi une problématique majeure. Les surfaces artificialisées et leur évolution, compte tenu de leur étendue, dispersion et structure spatiale, représentent un enjeu considérable à l'échelle territoriale. Derrière ces surfaces se cachent les zones d'habitat dense, les secteurs périurbains et ruraux, les industries, les infrastructures routières et autoroutières, aéroportuaires et portuaires, les équipements hydrauliques, les décharges, les zones commerciales et artisanales, les pépinières d'entreprises... Entre 1990 et 2012, 12 000 ha (+20 % d'espaces urbanisés) ont été grignotés par l'étalement urbain, mais le fait le plus remarquable est peut-être l'espace perdu. En effet, la métropole Aix-Marseille-Provence est une dévoreuse d'espaces : selon l'Agence d'urbanisme de l'agglomération marseillaise (AGAM), une croissance de 20 % d'espace urbain « pèse 10 000 ha au sein de la métropole Aix-Marseille-Provence, mais 5300 ha à Strasbourg ou Paris ». Le gain démographique se traduit donc par une perte d'espace plus importante que dans la majorité des métropoles françaises : 1 ha urbanisé entre 1990 et 2012 correspond à « environ 20 habitants, 17 résidences principales et 8 emplois », soit presque 2,5 fois moins qu'à Paris. La croissance urbaine est donc davantage horizontale que verticale.

Dans ce contexte de développement urbain et de changement climatique, cette étude fait un point sur la capacité de séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers de la métropole Aix-Marseille-Provence aujourd'hui et demain.



Foin, La Roque, @Daniel Kapikian

1. Le contexte territorial et réglementaire

Dans un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'adaptation au changement climatique, la métropole Aix-Marseille Provence doit prendre en compte les possibilités de séquestration de carbone sur son territoire, comme défini par le décret n°2016-849 du 28 juin 2016 relatif aux plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET) : « le diagnostic comprend une estimation de la séquestration nette de dioxyde de carbone et de ses possibilités de développement, identifiant au moins les sols agricoles et la forêt, en tenant compte des changements d'affectation des terres ; les potentiels de production et d'utilisation additionnelles de biomasse à usages autres qu'alimentaires sont également estimés, afin que puissent être valorisés les bénéfices potentiels en termes d'émissions de GES, ceci en tenant compte des effets de séquestration et de substitution à des produits dont le cycle de vie est plus émetteur de tels gaz. Une première approximation consiste à estimer la séquestration forestière directe liée aux forêts non défrichées, puis les émissions associées aux changements d'affectation des sols et enfin la séquestration carbone dans les produits bois ». Tout établissement public de coopération intercommunale (EPCI) à fiscalité propre de plus de 20 000 habitants doit respecter cette contrainte réglementaire. Avec près de 1,9 million d'habitants, le territoire métropolitain est soumis à cette mesure.

De manière générale, le PCAET est un « outil territorial à la fois stratégique et opérationnel ». Il inclut dans sa planification la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), l'adaptation au changement climatique, la qualité de l'air, la sobriété énergétique, l'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables. Pour rappel, les principaux objectifs de la loi de Transition énergétique sont :

- -40 % des émissions de GES en 2030 par rapport à 1990 ;
- -30 % de consommation d'énergies fossiles en 2030 par rapport à 2012 ;
- réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à 2012 ;
- part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation finale d'énergie en 2030 et à 40 % de la production d'électricité...

La contribution des collectivités territoriales est majeure pour atteindre ces objectifs. En effet, « 15 % des émissions de GES sont directement issues des décisions prises par les collectivités territoriales et près de 50 % en incluant les effets indirects de leurs orientations en matière d'habitat, d'urbanisme, d'aménagement, de transport »...



Vauvenargues, @Daniel Kapikian

Le PCAET entre dans une stratégie nationale complexe qui comprend différents échelons (Figure 4) :

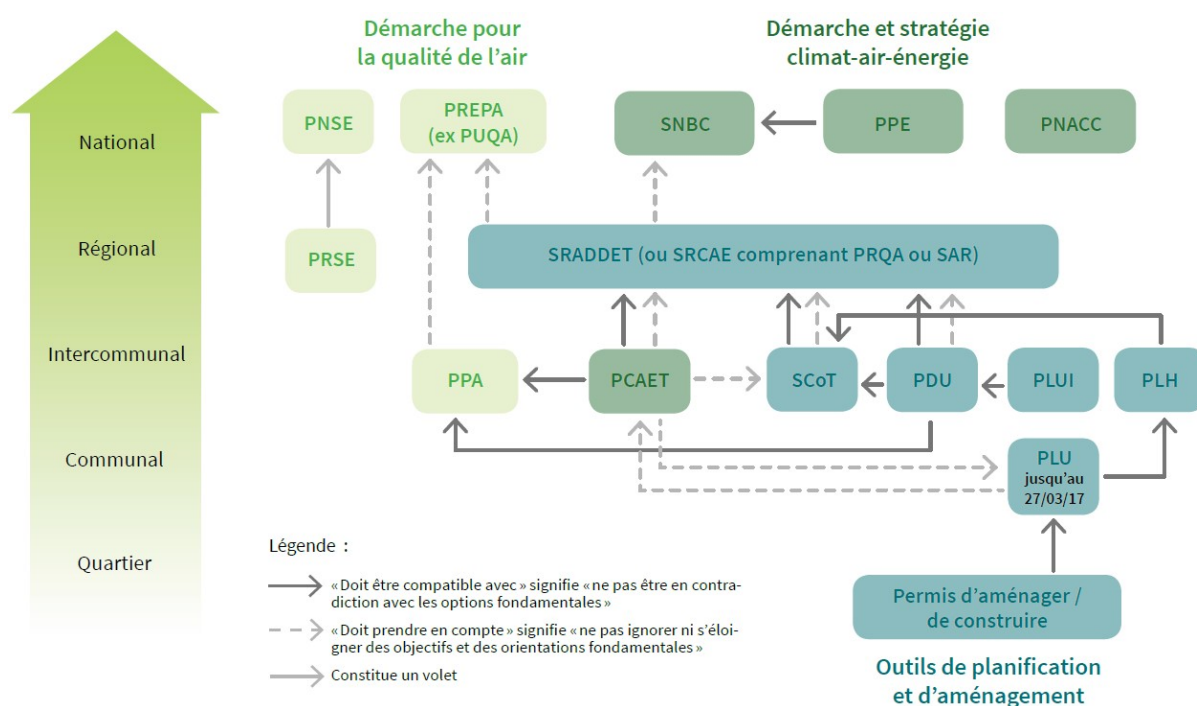


Figure 4. Positionnement du PCAET avec les outils de planification de l'échelle locale à nationale (source : guide « Élus, l'essentiel à connaître sur les PCAET »)

Cette imbrication de plans et schémas doit permettre aux EPCI de plus de 20 000 habitants de réduire significativement leur GES et de limiter les effets du changement climatique en favorisant en parallèle les actions d'adaptation du quartier à l'échelle intercommunale.

2. Le rôle potentiel des sols agricoles et forestiers dans l'atténuation des gaz à effet de serre

Réduire les émissions de GES est une piste pour lutter contre le changement climatique. Augmenter la quantité de dioxyde de carbone dans les sols agricoles et forestiers est l'une des alternatives crédibles qui consiste à renforcer le puits de carbone. Optimiser les pratiques agricoles et forestières, privilégier certaines variétés culturales et espèces forestières, choisir des occupations du sol susceptibles de stocker plus de carbone sont des actions qui renforcent l'atténuation des GES, mais aussi de manière directe ou indirecte l'adaptation au changement climatique. Accumuler des matières organiques dans les sols est donc une orientation vers laquelle les collectivités territoriales doivent tendre de manière réglementaire (EPCI obligés) et/ou volontaires pour celles qui veulent s'engager de manière solidaire. La matière organique est la principale forme de stockage du carbone. Elle est constituée d'organes (racines, feuilles...) et organismes morts, de déjections animales et de rhizodéposition³ dont la source provient des « molécules organiques excrétées par les racines dans le sol ». La matière organique inclut également la biomasse microbienne. Le stockage définitif n'est pas possible dans la mesure où la matière organique morte subit des « biotransformations (décomposition et finalement minéralisation par des micro-organismes, avec libération de CO₂) ». La vitesse de ces transformations dépend de « la composition de la matière organique et des conditions physico-chimiques locales (humidité, température, oxygène...) ». Toute matière organique est « à terme minéralisée » ce qui empêche le stockage définitif. La durée de stockage du carbone organique

³ Injections de composés organiques, directement dans le substrat via les racines des plantes vivantes

dans les sols n'excède pas en moyenne quelques décennies, mais les pas de temps sont très variables (de quelques heures à plusieurs millénaires). Cette durée dépend notamment de la « vitesse du processus de minéralisation par lequel le carbone organique est finalement restitué à l'atmosphère sous forme de CO₂ ».

Selon l'Institut national de la recherche agronomique (Inra), les « sols mondiaux contiennent près de 1 500 milliards de tonnes de carbone organique ». Le potentiel des sols est donc considérable et toute augmentation relative du stockage est la bienvenue pour limiter le flux net (déperdition) de GES vers l'atmosphère. L'enjeu est à la fois de réduire les émissions de GES, contenir le carbone piégé dans les sols et contribuer à la hausse du carbone séquestré dans les sols agricoles et forestiers à court, moyen et long terme. Parallèlement, les espaces habités et urbanisés doivent aussi jouer un rôle pour démultiplier les effets de la séquestration du carbone. Il est important de comprendre que le stockage temporaire peut s'avérer bénéfique, mais qu'il faut avant tout privilégier les pratiques qui accroissent la durée de stockage du carbone organique dans les sols. Viser le long terme est la priorité malgré la durée relative de stockage, même si les mesures à court terme ne sont pas à négliger selon le cas.

Vu le contexte du changement climatique et la dynamique des territoires urbains, périurbains et ruraux en France, il devient essentiel de repenser les pratiques agricoles et forestières, et proposer des pistes permettant l'accumulation du carbone organique dans les sols. L'objectif est de limiter l'effet de serre et ainsi de contribuer à l'effort collectif à l'échelle mondiale. Ces nouvelles pratiques doivent être réalistes à tous les niveaux (technique, économique, social, politique...) afin de les rendre acceptables par tous.

Les enjeux sont majeurs d'autant que le « Protocole de Kyoto, ratifié en mai 2002 par les pays de l'Union européenne, autorise les pays signataires à décompter de leurs émissions de gaz à effet de serre la séquestration de GES induite par des "activités supplémentaires". Ces activités visent principalement le piégeage de carbone dans la biomasse et dans les sols. Elles concernent d'une part les opérations de boisement, d'autre part le secteur agricole et la gestion forestière ("utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie") ». La France s'est d'ailleurs engagée à maintenir ses émissions de GES à leur niveau de 1990. Cet engagement vise donc une stabilisation par rapport à une date cible, malgré l'évolution démographique et les émissions anthropiques ces prochaines décennies à l'échelle nationale et globale.

Des ordres de grandeur à retenir :

- selon le rapport de l'Inra, les « activités agricoles et forestières sont responsables de 16 % des émissions brutes de GES en France, soit près de 24 mégatonnes équivalent charbon (MTec). Ces deux secteurs assurent en contrepartie une fixation nette de CO₂, estimée à 15 MTec par an ;
- Les sols des territoires métropolitains français stockent environ 3 milliards de tonnes de carbone. Les émissions annuelles brutes (en équivalent CO₂) sont proches de 148 millions de tonnes par an, soit environ 4,9 % des stocks dans les sols. Une augmentation de ces stocks de 0,2 % par an (6 Mt) permettrait de compenser 4 % des émissions brutes annuelles de GES, ou un quart environ des émissions des secteurs agricole et forestier. En ce sens, l'initiative « 4 pour 1000 » (Figure 5), lancée par un collectif (États, collectivités territoriales, entreprises, organisations professionnelles, ONG, laboratoires de la recherche...) le 1^{er} décembre 2015 à l'occasion de la COP 21 à Paris, a l'objectif de démontrer que les sols agricoles notamment « peuvent jouer un rôle crucial pour la sécurité alimentaire et le changement climatique. Il faut savoir que plus de la moitié de la superficie terrestre susceptible d'être couverte de végétation est utilisée pour l'agriculture (cultures ou prairies). Un taux de croissance annuel du stock de carbone dans les sols de 0,4 %, soit 4 ‰ par an, permettrait de stopper l'augmentation de la

concentration de CO₂ dans l'atmosphère liée aux activités humaines ». Le levier passe par le développement de l'agroécologie, l'agroforesterie, l'agriculture de conservation, la gestion des paysages... Ce type de pratiques a aussi l'avantage d'améliorer la fertilité des sols et la production agricole, d'éviter la dégradation des sols néfaste pour la sécurité alimentaire dans le monde.

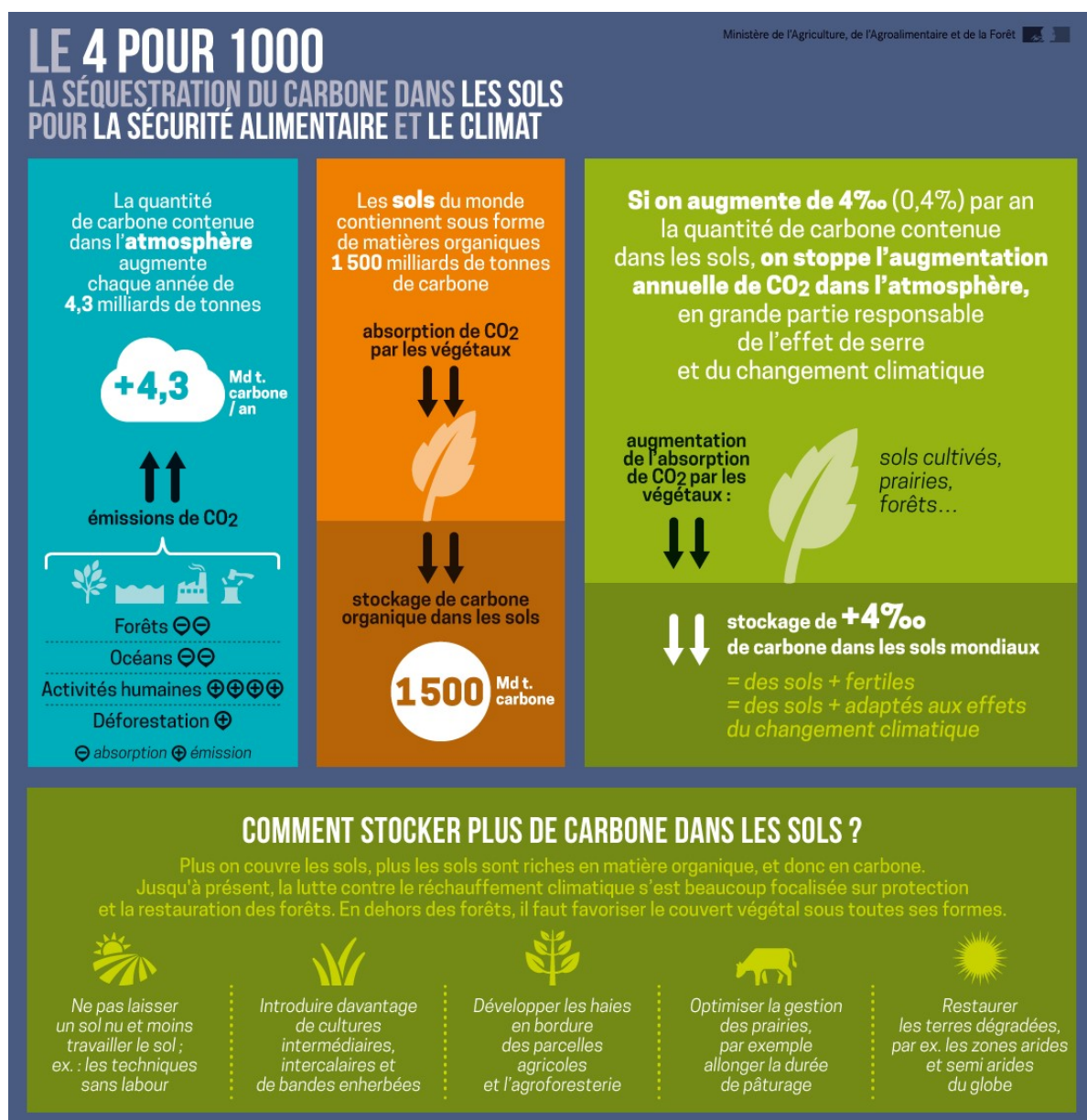


Figure 5. L'initiative 4 pour 1000 lancée lors de la COP 21⁴

L'agroécologie utilise des « systèmes de production qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes. Elle les amplifie tout en visant à diminuer les pressions sur l'environnement (réduire les émissions de gaz à effet de serre, limiter le recours aux produits phytosanitaires par exemple) et à préserver les ressources naturelles. Il s'agit d'utiliser au maximum la nature comme facteur de production en maintenant ses capacités de renouvellement »⁵.

⁴ Source : www.4p1000.org/fr/linitiative-4-pour-1000-en-quelques-mots

⁵ Source : agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-lagro-ecologie

L'agroforesterie associe les arbres et les cultures dans une même parcelle, les deux systèmes bénéficiant alors d'une « meilleure répartition des ressources (eau, lumière, nutriments) dans l'espace et dans le temps. Des cultures d'hiver avec des arbres fruitiers tardifs sont un exemple classique d'association, comme le blé et les noyers qui étaient encore présents en France avant l'industrialisation de l'agriculture, mais de nombreux autres systèmes ont existé et certains existent encore dans les régions méditerranéennes⁶. L'intérêt de l'agroforesterie en Méditerranée, et ce, dans un contexte de changement climatique, est « lié à différents aspects : une faible densité d'arbres plantés au milieu des cultures force les racines à chercher l'eau et les nutriments en profondeur, et l'ombre apportée par le feuillage avant les moissons est bénéfique dans les régions susceptibles de subir des périodes de forte chaleur et de vent soutenu. Les premières études montrent que la productivité totale de l'ensemble du système agroforestier est supérieure à celle des deux systèmes séparés. Certains systèmes agroforestiers sont conduits en agriculture biologique et s'appuient sur l'agrobiodiversité fonctionnelle pour protéger leurs cultures. On parle de sylvopastoralisme lorsque les arbres sont associés au pâturage, système d'une grande utilité pour conserver une production ligneuse minimisant les risques d'incendie et constituant donc une stratégie d'adaptation au changement climatique. Par ailleurs, une production diversifiée (cultures/élevage + bois d'œuvre/bois énergie/production fruitière) présente aussi un atout économique et intégrer des arbres aux cultures ou aux prairies participe à la séquestration du carbone qui peut faire l'objet d'une rétribution.

Les pratiques de conservation des sols combinent généralement le labour réduit ou le non-labour, un apport régulier de matière organique (résidus des cultures, paillage, compost, engrais verts, etc.) et une couverture permanente du sol (cultures intermédiaires, cultures de couverts). De cette façon, d'après le GREC-SUD, les sols séquestrent plus de carbone et contribuent ainsi à l'atténuation des émissions de GES et donc des effets du changement climatique. Par ailleurs, la moindre perturbation des organismes du sol maintient une activité biologique maximale, à condition que l'utilisation d'intrants chimiques reste limitée. Ces pratiques augmentent la stabilité des agrégats et la microporosité, ce qui permet une meilleure rétention de l'eau. Ces avantages offrent au champ cultivé une meilleure résistance au stress hydrique lors des périodes prolongées de sécheresse. Grâce à ses caractéristiques, l'agriculture de conservation est considérée comme une stratégie d'adaptation au changement climatique et d'atténuation dans les régions méditerranéennes. Les modes de conduite des cultures associés à l'agriculture de conservation, céréales et légumineuses par exemple, se rapprochent de ceux de l'agriculture biologique (aucun engrais ou pesticide de synthèse), car sont privilégiés une fertilisation azotée naturelle et le non-labour combattant de manière effective la prolifération des adventices dont la problématique s'affirme.

Estimer la quantité de carbone dans les sols reste un exercice particulièrement difficile, même si les connaissances scientifiques et techniques progressent.

3. La séquestration du carbone d'un point de vue théorique

De manière générale, les mesures *in situ* permettent d'apprécier le stock de carbone par des formules de conversion. Comme l'échantillonnage ne peut pas être exhaustif (long et coûteux), des valeurs sont estimées par extrapolation ce qui conduit à des erreurs accentuées par la grande variabilité des stocks. En effet, selon l'Inra, il « existe une forte variabilité temporelle et géographique des stocks de carbone dans les sols, ainsi qu'un gradient vertical marqué (les teneurs en carbone plus élevées en surface, décroissent en profondeur), mais variable ». Le manque de données locales est donc un frein majeur, d'autant que celles-ci ne sont pas toujours complètes et fiables, et réalisées

⁶ www.grec-sud.fr/cahier-thematique/le-cahier-agriculture-et-forets/

selon un protocole standard. Les efforts de modélisation en fonction des données d'entrée et de l'échelle spatiale permettent de fournir des estimations, mais ne remplacent pas la mesure en fonction de la spécificité et la structure des sols.

L'exploitation des données a toutefois permis d'estimer les stocks de carbone selon les modes d'occupation et les types de sols en France métropolitaine : « les stocks moyens par occupation du sol varient de 30 à 130 tonnes de carbone par hectare (tC/ha). Par exemple, les vignes et les vergers sont des cultures à très faible restitution organique. En conséquence, les stocks de carbone sont très faibles, environ 32 tC/ha. En revanche, les « sols sous prairies permanentes et forêts (litière exclue) » permettent de stocker près de 70 tC/ha. Ce chiffre peut dépasser 90 tC/ha dans les zones humides. Les sols des prairies et des forêts ont une capacité de stockage de carbone proche. À savoir : « une forte teneur en argile est le principal facteur corrélé à des stocks importants. Toutefois, des taux élevés de calcaire (rendzines) ou d'aluminium échangeable (podzols) permettent d'atteindre des stocks moyens dans des sols pauvres en argile » (Inra).

Compte tenu de la variabilité des sols, il est évident que les disparités régionales et territoriales sont grandes. L'occupation du sol et les conditions pédoclimatiques sont deux facteurs de différenciation importants. Cela signifie que le potentiel de stockage est très variable à l'échelle régionale et locale mais aussi très locale (échelle intraparcellaire par exemple).

Les phases de stockage et de déstockage s'étendent sur des durées différentes. Le stockage peut demander des décennies, même si « les stocks tendent vers un palier correspondant à un nouvel équilibre où entrées et minéralisation de matière organique se compensent, tandis que le déstockage peut s'avérer plus rapide, voire brutal en cas de changement d'usage des sols sans mesures de précautions ». Ce palier atteint, il faut toutefois maintenir les pratiques « vertueuses », ce qui se traduit par un engagement sur le long terme pour éviter une perte de carbone. Selon l'Inra, sur 20 ans, par exemple, le stockage lié à la conversion de la terre arable vers la forêt est deux fois plus faible que le déstockage induit par la conversion inverse. L'urbanisation d'une parcelle de forêt ou d'une terre arable peut faciliter un stockage de carbone très rapide si aucune précaution n'est prise.

Les sols agricoles et forestiers peuvent donc jouer un rôle essentiel pour séquestrer le carbone et limiter les effets du changement climatique, mais les pratiques et la gestion des terres mises en œuvre doivent suivre un protocole afin d'optimiser le potentiel de stockage dans les sols et la biomasse. De nombreux paramètres entrent en jeu : type de sol, profondeur des sols, humidité des sols, type de végétation (forêt, cultures, prairies, etc.), changement d'usage des sols... Le retournement des prairies permanentes, par exemple, est un risque majeur de déstockage de carbone.



Roquefort-la-Bédoule, @David Girard

3.1. Le carbone et son cycle

Il existe différents réservoirs de carbone (Figure 6) tels que l'atmosphère (biomasse aérienne), l'hydrosphère (masses d'eau), la biosphère (végétation haute et basse dite « biomasse ligneuse ») et la lithosphère (litière, subsurface et sol ou biomasse souterraine) qui sont des sources si émissions de carbone ou des puits si absorption. Parmi ces quatre réservoirs, c'est la lithosphère qui contient les plus grandes quantités de carbone dit « inorganique », comme celui des roches calcaires par exemple. Concernant le carbone dit « organique » (résultant des activités d'organismes vivants), c'est la biosphère qui présente le stock le plus élevé avec le compartiment « sols » pouvant contenir jusqu'à trois fois plus de carbone organique que la végétation. Ce rapport technique se focalise sur le carbone organique, à savoir celui stocké dans la biosphère, depuis la biomasse ligneuse jusqu'aux horizons profonds du sol (> 30 cm).

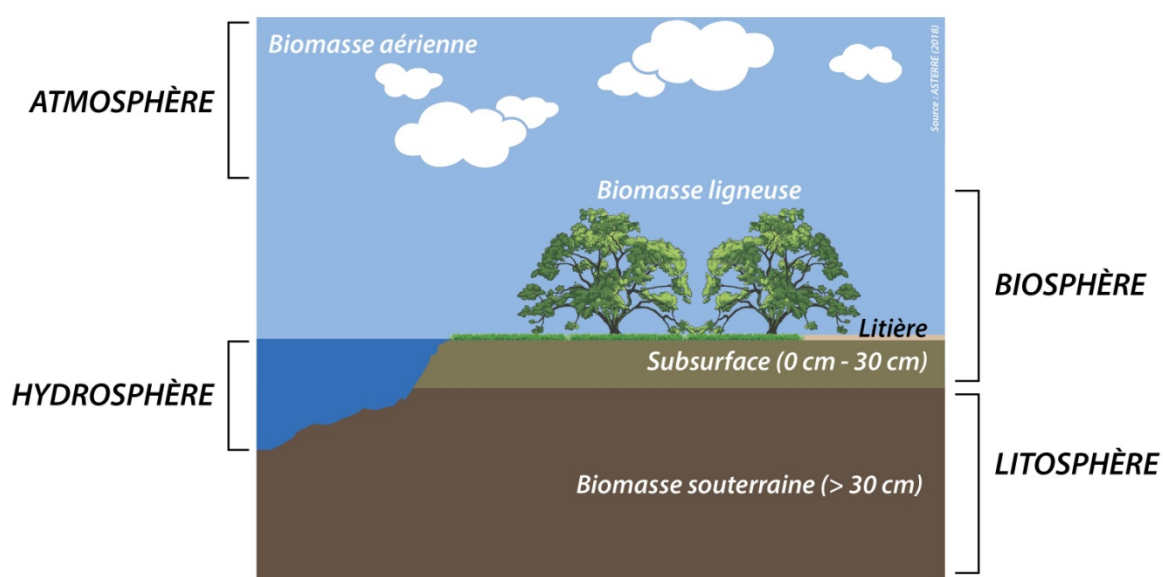


Figure 6. Schéma présentant les principaux réservoirs de carbone (ASTERRE, 2018)

Tout comme l'eau, la séquestration du carbone suit un cycle particulier (Figure 7) caractérisé par deux temporalités : le cycle long, qui se déroule sur des échelles de temps géologiques (millions d'années) et qui se caractérise par l'accumulation de combustibles fossiles organiques, gaz, pétrole, etc., et le cycle court, où les processus se déroulent sur quelques années, voire au maximum un siècle (Ciais *et al.*, 2013).

Concernant le cycle court, il est caractérisé par deux processus principaux : la photosynthèse et la respiration. Les plantes (aquatiques et terrestres) captent le CO_2 dans l'atmosphère grâce à la photosynthèse. Elles fixent le carbone du CO_2 et l'incorporent dans la biomasse, puis dans les sols sous forme de composés organiques par les racines et la décomposition des plantes et d'autres organismes vivants. Le carbone piégé dans le sol contribue alors à l'absorption d'une partie du CO_2 de l'air. Par le processus de respiration, les végétaux rejettent également du CO_2 dans l'atmosphère.

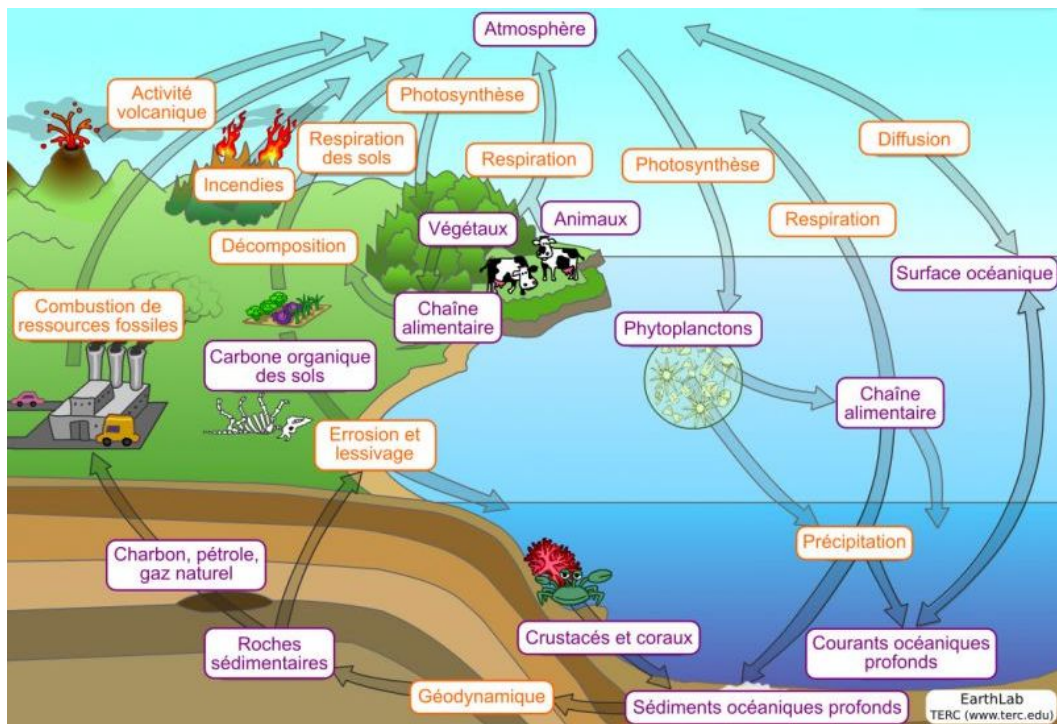


Figure 7. Le cycle du carbone (Earthlab)

Espaces forestiers et agricoles sur le territoire de la métropole Aix-Marseille-Provence (MAMP)

Les espaces forestiers et agricoles sont deux environnements où les stocks de carbone sont potentiellement les plus élevés, et où les actions de gestion des stocks sont bien connues (Arrouays *et al.*, 2002).

Les forêts (33 % de la surface totale de la MAMP) sont implantées principalement sur les nombreux chaînons calcaires du territoire. Lorsque la forêt est moins dense, elle laisse place à un paysage de garrigues largement répandu sur le territoire car il est très adapté au climat méditerranéen. Malgré une importante superficie couverte par la végétation, les horizons superficiels (premiers centimètres des sols) sont assez peu développés (faible taux de matière organique). Ces environnements calcaires sont soumis aux aléas inondation et incendie qui induisent une forte érosion des sols ne facilitant pas une implantation durable de la végétation.

Les territoires agricoles occupent aujourd'hui un peu moins d'un quart de la surface du territoire. Ils comprennent les cultures permanentes, les terres arables, les zones agricoles complexes ou en mutations, et les prairies. Les prairies de type agricole représentent un stock potentiel de carbone élevé mais ne représentent que 3 % de la superficie totale de la MAMP. Quant aux autres classes agricoles, elles présentent un stock potentiel moyen mais sont des zones à fort potentiel. En effet, modifier leur affectation en terres arables, par exemple, ne présente pas d'obstacles majeurs.

3.1.1. Les fonctions de la biomasse

La biomasse joue un rôle majeur dans le cycle du carbone car elle permet, *via* le processus de photosynthèse, de stocker le CO₂ sous forme de matières organiques vivantes ou mortes. La production de matières organiques par les organismes photosynthétiques est appelée « production primaire » car les organismes photosynthétiques se situent toujours en début de chaîne alimentaire. Cette production primaire, en plus de constituer un stockage temporaire de CO₂, peut également servir de base à la production secondaire, à savoir nourrir les autres êtres vivants. Ces derniers vont

ensuite dégager une partie du CO₂ par le processus de respiration et permettre un stockage à court terme du carbone dans la litière et les sols sous forme d'humus, ou à plus long terme dans les roches énergétiques (tourbe, charbon, pétrole, gaz, etc.).

3.1.2. Les fonctions des matières organiques

Les matières organiques assurent des fonctions essentielles dans les sols en termes de fertilité chimique (nutrition des plantes), fertilité biologique (ressource trophique des organismes vivants du sol), qualité physique (rétention de l'eau, structure du sol), mais aussi en termes de qualité de l'eau (par la production de nitrates et phosphates, et la rétention des pesticides et métaux), de qualité de l'air (production de gaz à effet de serre : CO₂, N₂O, CH₄) et de gestion du cycle des polluants. Les matières organiques se renouvellent constamment par apport et biodégradation (débris végétaux et organismes vivants, molécules organiques associées aux minéraux du sol). Plus de minéralisation entraîne une hausse de la capacité d'échange cationique⁷ (CEC), une plus grande stabilité structurale, une plus grande protection de la surface du sol vis-à-vis de la pluie notamment et donc permet de limiter la battance des sols (surtout en contexte agricole).

3.2. État des connaissances générales et verrous associés à la séquestration du carbone

La séquestration du CO₂ atmosphérique par les écosystèmes (biomasse et sols) est un champ de recherche majeur, vaste, complexe et interdisciplinaire dans la mesure où ce phénomène est l'un des leviers d'action permettant de réduire les émissions de GES (West *et al.*, 2002 ; Arrouays *et al.*, 2002 ; Nasi *et al.*, 2009). C'est une variable complexe car elle varie spatialement et temporellement en fonction de l'occupation de surface, du type de sol et des propriétés, ainsi que du climat et de l'altitude.

Pourtant cette problématique n'est apparue qu'au début des années 1990 dans les réflexions sur le changement climatique et les scénarios d'atténuation (Balesdent, 1996). Dès lors, les mesures de la teneur en carbone des sols se sont multipliées, permettant de disposer aujourd'hui d'une connaissance sur le stockage potentiel de carbone par occupation de surface (sol et biomasse) à travers le monde. Parallèlement, des expériences *in situ* ont été menées pour estimer les variations de stock associées à différentes pratiques (changement d'usage des sols, des intrants, des pratiques agricoles, etc.).

S'il est désormais possible d'estimer le stock de carbone d'une parcelle à un instant T, des incertitudes et questionnements demeurent quant à la mesure du stock de carbone, et à l'évolution à court, moyen et long terme des stocks de carbone. Comment estimer l'impact des occupations du sol passées dans le cas d'un changement d'affectation du sol ? Comment estimer les effets bénéfiques ou non d'un changement d'usage de sol ou d'une pratique ? Comment prévoir les déstockages naturels de carbone ?

3.2.1. Différence entre stock et flux

Le terme de « stock » désigne la quantité totale de carbone stockée sur une parcelle de terrain à un moment donné dans un ou plusieurs puits de carbone (GIEC, 2006). Les stocks de carbone sont soumis à des « flux » correspondant aux variations de teneur en carbone liées à différents facteurs tels que la croissance des forêts, le changement d'affectation des sols, le choix des cultures, la gestion d'apports exogènes et bien évidemment le changement climatique. D'après les travaux d'Arrouays *et al.* (2002), les sols déstockent beaucoup plus vite qu'ils ne stockent, ce qui signifie que

⁷ Représente la taille du réservoir permettant de stocker de manière réversible certains éléments fertilisants cationiques (potassium, magnésium, calcium...)

les flux « sortants » sont plus importants que les flux « entrants ». Les dynamiques de stockage et de déstockage de carbone sont asymétriques et non linéaires (Figure 8).

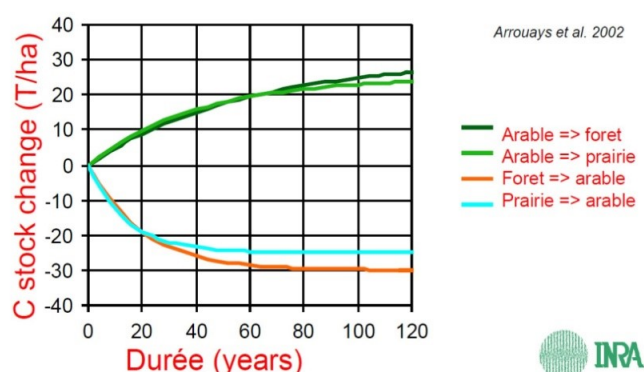


Figure 8. Dynamiques de stockage/déstockage suite à un changement d'affectation du sol. Exemples donnés pour les conversions entre terre arable, forêt et prairie (Arrouays *et al.*, 2002)

3.2.2. Les méthodes de gestion des stocks de carbone

Le carbone joue sur les apports de matière organique au sol et sur la vitesse de minéralisation. Mais ce rôle est dépendant des pratiques agricoles qui influent fortement sur les quantités stockées ainsi que sur le temps de résidence du carbone dans le sol. Le maintien des puits de carbone passe par la mise en place ou le maintien de pratiques dites « stockantes » comme la réduction des intrants toxiques ou le travail du sol simplifié. Le travail du sol entraîne un déstockage très rapide du carbone, une perte de stabilité et de structure, ainsi qu'un appauvrissement de la quantité de matière organique en subsurface. Ceci permet d'expliquer les déstockages de carbone massifs associés à la déforestation. Il faut aussi noter que les pratiques tendant à stocker du carbone dans les sols présentent presque toujours des bénéfices environnementaux : hausse de la qualité des sols, hausse de la qualité de l'eau, maintien de la biodiversité, réduction de l'érosion, réduction du ruissellement et des polluants associés. Enfin, il est avéré que le stockage est lent, fini et réversible (Chenu, 2014).

3.2.2.1. Les méthodes permettant une augmentation des stocks de carbone dans le sol

À l'échelle nationale, les travaux menés depuis les années 1990 ont permis de mettre en avant certains changements d'usage ou de pratiques permettant une augmentation des stocks de carbone dans le sol (Arrouays *et al.*, 2002). Il faut ainsi distinguer les changements d'usage des terres des changements des pratiques agricoles.

Dans le cas des changements d'usage des terres peuvent être listées les actions suivantes :

- convertir les terres labourées en prairies permanentes ;
- convertir les terres arables en prairies permanentes : le stockage induit par la conversion d'une terre arable en forêt est deux fois plus élevé que le stockage induit par la conversion inverse ;
- restaurer les terres dégradées ;
- encourager et favoriser l'agroforesterie (associer des arbres aux cultures et/ou à l'élevage) et augmenter la surface forestière ;

Dans le cas des changements des pratiques agricoles peuvent être listées les actions suivantes :

- restituer les résidus de culture ;
- développer les cultures intermédiaires et intercalaires ;
- développer les prairies temporaires ;
- apporter des produits résiduels organiques ;
- accroître la couverture des sols ;

- limiter le travail du sol ;
- enherber les vignobles de façon permanente ;
- augmenter la surface enherbée au niveau des terres cultivées ;
- planter des haies près des surfaces agricoles.

L'avantage de l'agroforesterie

D'après une récente étude publiée dans une revue coordonnée par le CIRAD compilant 50 publications scientifiques sur le carbone dans la végétation (234 observations) et 72 publications sur le carbone des sols (218 observations), le gain de carbone organique dans le sol dû à l'agroforesterie varie entre 14 % et 21 % en zones tempérées (Cardinael *et. al*, 2018). En effet, les arbres permettent l'acquisition de ressources que la culture n'obtiendrait pas seule.

3.2.2.2 Les méthodes permettant une augmentation des stocks de carbone dans la biomasse

Il existe différentes stratégies favorisant la séquestration du carbone par la biomasse notamment en milieu forestier. Différentes pratiques existent, depuis la gestion des forêts jusqu'à l'usage final du bois en passant par les diverses étapes de production. La question de la séquestration du carbone concerne ainsi la filière bois dans son ensemble.

Pour favoriser la production de bois et la séquestration nette en forêt peuvent être listées ces actions :

- assurer la régénération après exploitation ;
- restaurer les forêts dégradées ;
- convertir les taillis en futaies et améliorer les accrus ;
- afforester⁸ en limitant les changements d'affectation des sols ;
- favoriser la mise en place de zonages réglementaires et la protection des « vieux arbres » ;
- favoriser les îlots de sénescence.

Les autres actions visent principalement à développer la filière bois-énergie-matériau en favorisant l'approvisionnement local et la gestion forestière durable tout en établissant des critères de suivi afin d'optimiser le bilan carbone de la filière.

3.2.2.3. Incertitudes liées à l'évolution du stock et à l'impact d'un changement d'occupation de surface

Bien que le potentiel de stockage moyen d'un sol puisse être désormais estimé, la question de la stabilité et de la réversibilité des stocks de carbone à court, moyen et long terme reste un verrou scientifique et méthodologique. Si des expériences *in situ* permettent d'appréhender l'impact d'un changement d'affectation des sols d'une parcelle donnée, elles ne sont pas assez nombreuses pour être extrapolées à toutes les échelles et tous les types de territoire. En effet, le stockage est variable spatialement et temporellement, et dépend des propriétés du sol étudié, mais aussi de son histoire passée et des conditions climatiques locales. Ainsi, la dynamique de stockage/déstockage associée à la conversion d'une parcelle de blé en parcelle forestière ne sera pas la même d'une région à une autre, même soumise à un climat similaire. Les travaux de modélisation doivent permettre de réduire les incertitudes associées aux changements d'occupation des sols même si certains phénomènes comme le déstockage rapide d'une parcelle restent difficiles à prévoir. D'autre part, il n'est pas évident de savoir si le retour à l'état initial d'une parcelle donnera nécessairement lieu à une

⁸ Concéder le droit d'afforestation (droit de prendre du bois dans une forêt)

séquestration similaire à celle passée (exemple : ancienne zone humide asséchée pour l'agriculture redevenant une zone humide). Enfin, bien que les effets des pratiques dites « stockantes » soient presque toujours présentés comme bénéfiques pour l'environnement (stabilisation de la structure du sol, baisse de l'érosion, augmentation de la biodiversité, etc.), il est important de garder à l'esprit, à titre d'exemple, que certains intrants destinés à améliorer la productivité des parcelles et ainsi la biomasse peuvent avoir des conséquences négatives sur le cycle de l'eau et la pollution de l'air.

3.3. Méthodes et outils d'estimation de la séquestration

Ce sous-chapitre met en avant les différentes méthodes et outils développés pour estimer la séquestration du carbone dans les sols.

3.3.1. Estimation du stockage et des variations de stock de carbone dans les sols et la biomasse : volet scientifique

Il n'existe actuellement pas de moyen de mesurer de façon indirecte le carbone dans les sols. La connaissance actuelle est basée sur des mesures locales dont les échantillons analysés en laboratoire permettent d'estimer les variables (épaisseur des sols, porosité, taux de matière organique, etc.) nécessaires à l'évaluation du stock de carbone dans les sols et la biomasse. Face au coût financier élevé (main d'œuvre et matériel) lié à l'installation des réseaux de mesure, à leur suivi, et aux analyses en laboratoire, la modélisation informatique est une solution évidente. Les modèles reposent sur des équations mathématiques (issues de la littérature, d'expériences locales et en laboratoires) dont les termes sont représentés par les variables mesurées *in situ*. La capacité computationnelle est désormais telle qu'il est possible d'incrémenter un très grand nombre de données et de paramétrer les modèles sur des territoires extrêmement vastes. Malgré tout, la modélisation est contrainte par le manque de données. En effet, l'application de ces modèles à toutes les échelles requiert des données acquises dans diverses conditions d'occupation du sol, de pédologie, de géomorphologie et de forçages climatiques, et donc des réseaux de mesures denses développés sur de nombreux territoires.

3.3.1.1. Modélisation du stock de carbone dans les sols

L'estimation du stockage de carbone dans le sol et la litière repose sur de nombreuses équations. Par souci de synthèse, l'équation proposée ici permet de calculer de manière simplifiée le stockage de carbone dans le sol à l'aide quelques variables indispensables à sa mesure (Arrouays *et al.*, 2002 ; Chenu *et al.*, 2014) :

$$\text{Stock Carbone (C}_t\text{/ha)} = C_{\%} * D_{g/cm^3} * e_{cm}$$

avec C = teneur en carbone du sol, Da = densité apparente, e_{cm} = épaisseur de l'horizon du sol pris en compte.

Comme expliqué précédemment, malgré un faible nombre de paramètres requis par cette équation, leur acquisition dans différents contextes (selon le type et l'usage du sol, le climat...) est très difficile, d'où l'utilisation de valeurs « constantes » ou « moyennes » à des échelles souvent supérieures (régionale, cantonale...) à celle à laquelle est appliquée l'équation.

3.3.1.2. Modélisation du stock de carbone dans la biomasse

Pour les sols, les équations permettant de quantifier le stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire, hors forêt, en forêt, et par type d'essence sont nombreuses. À ce titre, la méthode ClimAgri 2.0⁹ donne accès librement à toutes les équations développées dans l'outil. Des équations

⁹ www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-agricole/passer-a-l'action/dossier/evaluation-environnementale-agriculture/loutil-climagri

et coefficients moyens de stockage ont été également définis à partir d’une synthèse bibliographique réalisée dans le cadre du projet CARBOFOR en 2005 (Vallet *et al.*, 2006). Il s’agit de la même méthode de calcul que celle utilisée pour renseigner l’inventaire GES de la France coordonné par le Centre interprofessionnel technique d’études de la pollution atmosphérique (CITEPA). Cette méthode est identique à celle de l’expertise INRA-IGN (2017) portant sur le puits de carbone de la filière forêt-bois française à l’horizon 2050. Les paramètres alimentant ces équations sont également très nombreux (volume de bois mort, facteur d’expansion des branches, biomasse aérienne, circonférence et hauteur des arbres, etc.) et difficiles à acquérir selon les contextes. Il n’est donc pas possible de présenter ici une équation synthétique de calcul du stock de carbone pour la biomasse totale.

3.3.2. Les bases de données existantes sur le carbone dans les sols et la biomasse : volet technique

À l’échelle mondiale et européenne, de nombreuses bases de données permettent de disposer des variables nécessaires au calcul des stocks et flux de carbone dans les sols et la biomasse. La combinaison de ces différentes bases permet d’obtenir un panel d’informations relativement complet. Pour exemple, la base de données SoilGrids compile quatre bases de données sur les propriétés des sols à l’échelle européenne afin de proposer une cartographie des stocks de carbone organique contenu dans les sols à six profondeurs différentes et sur une grille de 250 m de côté. Les cartographies sont issues d’un modèle de type "machine learning" consistant à estimer en un point donné la variable souhaitée au regard de toutes les mesures de cette variable effectuées dans des conditions pédologiques similaires au point étudié. Ainsi, malgré les incertitudes associées à cette information, SoilGrids permet d’accéder à une information spatialisée fort utile pour caractériser le potentiel de stockage d’un territoire. La Figure 9 met en avant les fortes variations de carbone organique contenu dans les sols à l’échelle de la métropole AMP. Plus la profondeur prise en compte est grande, plus les stocks de carbone sont élevés et plus la dichotomie entre espaces naturels¹⁰ et espaces urbanisés est marquée.

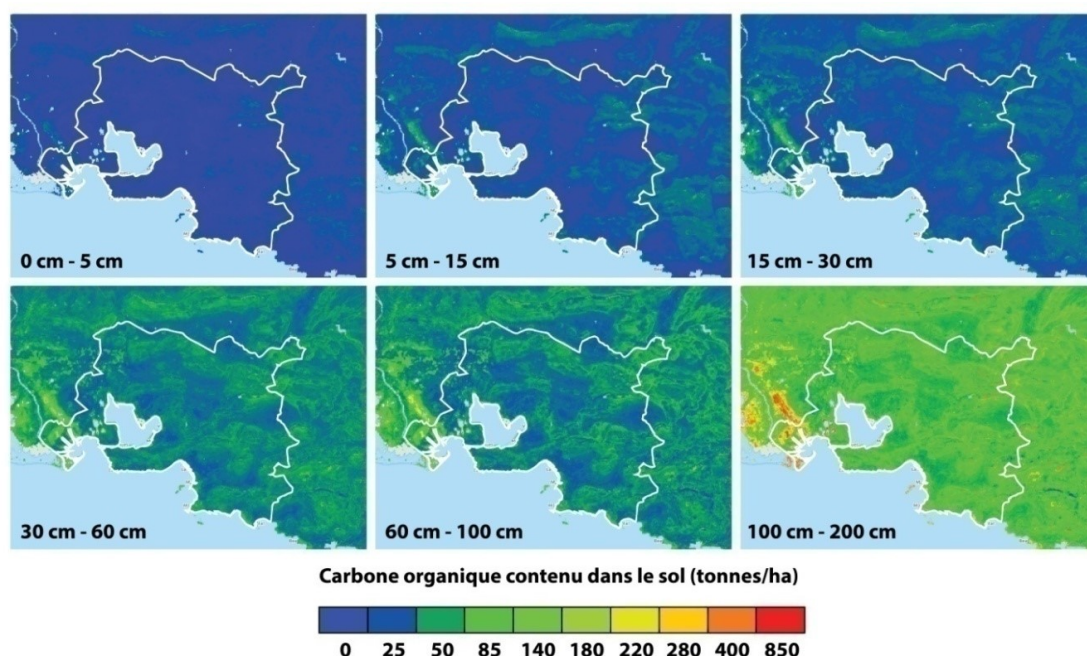


Figure 9. Exemple de cartographie produite par la base de données SoilGrids. Elle représente le stock de carbone organique contenu dans le sol à six profondeurs différentes à une résolution spatiale de 250 m

¹⁰ Par « espaces naturels », il faut entendre « espaces semi-naturels » sur le territoire métropolitain car ils sont dégradés par les activités anthropiques. En Méditerranée, les espaces purement naturels sont rares

À l'échelle nationale, le groupement d'intérêt scientifique Gis SOL¹¹ formé depuis 2001 travaille sur la mesure de la qualité des sols français. Le Gis SOL dispose à présent d'une base de données sur les caractéristiques des sols¹² (teneur en argile, capacité d'échange cationique, granulométrie, texture, etc.) facilitant l'estimation des stocks de carbone à différentes échelles (nationale, régionale, départementale et intercommunale). Le nombre de données disponible permet désormais de connaître le potentiel de stockage par type d'occupation de surface. Le croisement des valeurs de stock et/ou de flux unitaire de carbone avec des données d'occupation des sols fines donne la possibilité d'obtenir assez rapidement des estimations à l'échelle locale.

La Figure 10 présente sept exemples de bases de données disponibles pour caractériser les sols et la biomasse en vue d'estimer les stocks et les flux de carbone :

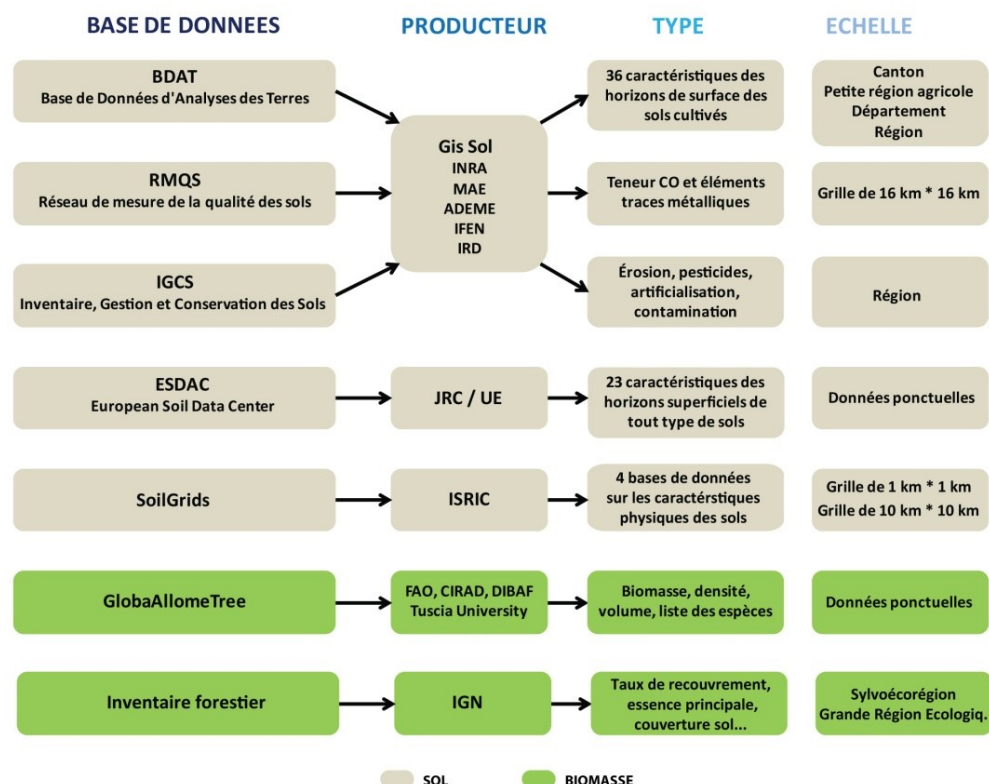


Figure 10. Exemples de bases de données sur les caractéristiques des sols et de la biomasse pour le calcul des stocks et flux de carbone

3.3.3. Les méthodes de cartographie potentielles : volet opérationnel

Au regard des méthodes et outils d'estimation de la séquestration présentés dans ce rapport, le tableau suivant s'attache à proposer des méthodes de cartographie des stocks de carbone de l'échelle régionale à parcellaire. Pour cela, chaque proposition de méthode est présentée avec les données à utiliser, l'échelle d'application, la source des données et/ou équations, la description de la méthode ainsi qu'un commentaire présentant les avantages et/ou limites. Cette partie est purement exploratoire.

¹¹ Le Gis Sol regroupe le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, l'Institut national de la recherche agronomique (Inra), l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)

¹² À la demande des agriculteurs, les analyses de sol sont réalisées par des laboratoires agréés

Méthode	Données	Échelle	Source	Description	Commentaire
Méthode 1 : stock de carbone organique par région	moyenne de stock de carbone organique (0- 30 cm) par occupation de surface	région	Gis Sol	Les données disponibles sont les valeurs (min., max., moy., médiane) de carbone organique en kg/m ² obtenues par occupation des sols. Il faut les transformer en T/ha. Puis, il faut multiplier les valeurs de stock de référence de chaque occupation de surface par la surface qu'elle représente à l'échelle régionale	Méthode assez grossière car une seule valeur de référence par occupation des sols est utilisée. Mais elle est facile à mettre en œuvre
Méthode 2 : stock de carbone organique par canton	propriétés des sols par canton	canton	Gis Sol	Il faut appliquer l'équation développée dans le §3.4.1.1. à l'échelle cantonale. Pour cela, il faut extraire à cette échelle les variables demandées dans l'équation	Tous les cantons ne disposent pas des données requises. Le nombre de mesures effectuées varie selon les cantons. En revanche, les données sont disponibles à plusieurs dates, ce qui permet de calculer un stock et un flux entre plusieurs dates
Méthode 3.1 : stock de carbone organique par parcelle, commune, canton...	stock de C mesuré ponctuellement avec localisation par GPS (coordonnées XY)	parcelle, commune, canton...	Gis Sol	À partir de mesures de stockage de carbone effectuées ponctuellement, il est possible d'estimer une valeur moyenne par type d'occupation des sols. Plus un type d'occupation des sols dispose de mesures ponctuelles, moins les incertitudes sont grandes	Cette méthode demande beaucoup de prélèvements par parcelle pour obtenir une certaine représentativité par occupation des sols. L'avantage est de collecter des mesures locales représentatives, à une échelle fine, d'un type de sol ou climat donné, etc.
Méthode 3.2 : stock de carbone organique par parcelle, commune, canton...	propriétés des sols mesurées ponctuellement avec localisation par GPS (coordonnées XY)	parcelle, commune, canton...	Gis Sol	Contrairement à la méthode 3.1 qui part de mesures ponctuelles de carbone organique dans les sols pour obtenir des valeurs représentatives par occupation de sol, cette méthode 3.2 part de variables des sols mesurées ponctuellement pour calculer la quantité de carbone organique par occupation des sols	Cette méthode est la plus adaptée à l'échelle de la parcelle, mais difficilement reproductible à grande échelle. Elle permet également de maîtriser les incertitudes associées à la mesure (nombre de prélèvement, écart-type...)

Tableau 1. Propositions de méthodes de cartographies du carbone organique à différentes échelles sur le territoire français

3.3.4. Incertitudes et limites associées à la modélisation et aux données disponibles

Les estimations de stockage et de flux de carbone par la modélisation peuvent être entachées d'incertitudes en raison de plusieurs facteurs :

- acquisition des données : l'acquisition des données pédoclimatiques et agricoles alimentant les modèles peut représenter un verrou tant ces dernières varient spatialement, mais aussi temporellement. Même s'il est désormais possible de mesurer le stock potentiel à partir d'un nombre de variables restreint, la mesure demeure compliquée en raison d'un grand nombre de prélèvements nécessaires pour obtenir des ordres de grandeur représentatifs à l'échelle désirée, ce qui représente un coût élevé notamment pour réaliser les analyses en laboratoire. Enfin, la mesure elle-même présente des incertitudes à travers les outils utilisés et les méthodes d'analyse des échantillons ;
- échelle d'analyse : les estimations à l'échelle nationale ou régionale, même si elles donnent une information synthétique, sont à interpréter avec précautions car elles ont tendance à « lisser » les résultats. Toutefois, l'estimation des stocks de carbone à l'échelle d'une parcelle n'en demeure pas moins compliquée tant elle nécessite des données *in situ* difficiles à acquérir ;
- combinaison des bases de données : malgré le grand nombre de bases de données sur les sols et la biomasse, il est difficile de les croiser en raison des diverses échelles spatio-temporelles de l'acquisition des données. De plus, les valeurs brutes ne sont pas toujours accessibles avec les coordonnées géographiques des points de mesure, tout comme les incertitudes associées aux mesures. Lorsque des données cartographiques existent, elles ne sont pas systématiquement exploitables à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG). Leur format peut s'avérer spécifique et/ou non interopérable. Enfin, malgré la quantité d'information proposée par ces outils, ces derniers sont confrontés au problème majeur de mise à jour des données qui est un paramètre essentiel pour réduire les incertitudes liées aux estimations issues des modèles de mesure des stocks et flux de carbone ;
- profondeur de sol : le calcul des stocks de carbone dans un sol donné nécessite un certain nombre de propriétés liées au sol, mesurées classiquement entre 0 cm et 30 cm de profondeur. Pourtant, ces propriétés varient selon la profondeur investiguée et selon le type de sol. À titre d'exemple, la densité apparente d'un sol agricole labouré varie avec la profondeur en raison de la compaction du sol. Une estimation précise de stock de carbone à l'échelle d'une parcelle nécessiterait donc une estimation à différentes profondeurs et en période de labour et hors période de labour ;
- connaissance de l'historique de l'usage des sols : le stockage de carbone varie selon l'usage des sols et l'histoire récente de ce sol (dernières décennies). Cette variable est indispensable dans le cas d'un suivi des flux de carbone d'une parcelle dans le temps ou d'une mesure de flux associé à un changement d'affectation des sols de cette même parcelle ;
- inadéquation entre la complexité des modèles et les données disponibles : mesurer le stockage et les flux associés à un usage du sol ou à un changement de pratique agricole nécessite la prise en compte d'un grand nombre de variables (porosité, capacité d'échange cationique, intrants toxiques, etc.) et de phénomènes (érosion des sols, battance, etc.). Or, comme vu précédemment, l'acquisition de ces données est un verrou méthodologique majeur.

Cette synthèse des méthodes et outils existants et des incertitudes qui leur sont associées a permis d'explorer l'outil ALDO développé par l'ADEME qui présente des atouts pour estimer les stocks et les flux de carbone à l'échelle communale et intercommunale. L'outil prend en compte les réservoirs du sol, la litière, la biomasse (en forêt et hors forêt) et les produits bois. Les formules de calcul utilisées sont basées sur l'état de l'art en matière de séquestration du carbone. Elles ont été principalement développées à l'Inra. Les données sont issues de bases de données françaises récentes et actualisées au fil du temps. ALDO utilise en routine la base de données d'occupation des sols européenne Corine Land Cover (CLC), mais l'outil donne la possibilité d'affiner les estimations de stock et de flux de carbone en incrémentant des données locales à une meilleure résolution spatiale. Enfin, les limites et améliorations possibles de l'outil sont présentées.

4. Estimation de la séquestration du carbone à l'échelle de la métropole

Ce chapitre aborde l'estimation de la séquestration du carbone sur le territoire métropolitain avec l'outil ALDO de l'ADEME.



Cornillon, ©Caroline Chevalier

4.1. Présentation de l'outil ALDO

ALDO a été conçu par Léna Perez, Miriam Buitrago et Thomas Englin (ADEME), dans le but de réaliser une « estimation des stocks et des flux de carbone des sols et forêts, liés aux changements d'affectation des sols et aux pratiques agricoles à l'échelle d'un EPCI » (ADEME, 2018). À partir de nombreuses bases de données (ADEME, Gis Sol, IGN, CITEPA), des valeurs de stock et de flux de carbone ont été calculées et référencées pour chaque type d'occupation des sols (typologie déterminée à partir de Corine Land Cover) et pour chaque EPCI français. Ainsi, à partir d'une multiplication de la surface d'un type d'occupation des sols par la valeur de référence de stock ou de flux de CO₂ qui lui est attribué, trois paramètres peuvent être calculés :

- l'état des stocks de carbone des sols et de la litière, de la biomasse et des produits bois en fonction de l'aménagement de son territoire (occupation du sol) ;
- la dynamique actuelle de stockage ou de déstockage liée aux changements d'affectation des sols, aux forêts et aux produits bois en tenant compte du niveau actuel des prélèvements de biomasse ;
- les potentiels de séquestration nette de CO₂ liés à diverses pratiques agricoles pouvant être mises en place sur le territoire (ADEME, 2018).

L'outil présente sous la forme d'un classeur Excel comportant 4 thèmes déclinés en 16 onglets (Tableau 2) :

Onglets		Source des données utilisées pour les calculs	
Nom	Descriptif		
cadre_de_depot	résultats présentés au format du cadre de dépôt (partie diagnostic). Le numéro SIREN de l'EPCI doit être rentré dans cet onglet en case A2	ADEME	RESULTATS
resultats_graphiques	sorties graphiques des principaux résultats issus de l'outil : répartition des stocks de carbone par occupation du sol, stocks de référence par occupation du sol, flux de CO2 de l'EPCI par occupation du sol	ADEME	
stocks_C	diagnostic des stocks de carbone dans les sols, la litière, la biomasse et les produits bois	ADEME, GIS Sol, IGN, CITEPA	
flux_C	diagnostic des flux de carbone des sols, de la litière, la biomasse et les produits bois	ADEME, GIS Sol, IGN, CITEPA	
pratiques_agricoles	diagnostic des stocks et flux de stockage de carbone liés à la mise en œuvre de pratiques agricoles dites « stockantes »	INRA, Pellerin <i>et al.</i> , 2013	
dendro_forêts	données dendrométriques des compositions forestières (conifères, feuillus, mixtes, peupleraies)	IGN	
typologies_OCSOL	correspondance utilisée entre la typologie d'occupation des sols Corine Land Cover et celle de l'outil pour la détermination de stocks et de flux	-	TYPO SURFACES
References_sols	valeurs de référence des stocks/flux de carbone dans les sols par occupation/changement d'occupation des sols	ADEME	Valeurs de références STOCKS/FLUX
References_biomasse_hors_foret	valeurs de référence des stocks/flux de carbone dans la biomasse hors forêt par occupation/changement d'occupation des sols	CITEPA	
References_biomasse_foret	valeurs de référence des stocks/flux de carbone dans la biomasse hors forêt par composition forestière	IGN	
References_biomasse_peupleraies	valeurs de référence des stocks/flux de carbone dans la biomasse pour les peupleraies	IGN	
References_surfaces_haies	valeurs de références pour les surfaces de haies associées aux espaces agricoles	INRA, IGN, CITEPA	
References_produitsbois	valeurs de références utilisées pour le calcul des flux dans les produits bois (données de prélèvements, récoltes)	ADEME	
EPCI_clc12	surfaces en 2012 par occupation du sol issues de Corine Land Cover	CLC	Valeurs de références SURFACES
EPCI_bc_clc12	variations de surfaces entre 2006 et 2012 par occupation du sol issues de Corine Land Cover	CLC	
EPCI_surffor_ign	surfaces forestières en 2012 par composition forestière issues d'une étude de l'IGN	IGN	

Tableau 2. Description des onglets disponibles et références utilisées dans ALDO (source : ADEME, 2018)

4.1.1. Calcul des stocks de carbone

Le calcul des stocks de référence de carbone prend en compte d'un côté « l'occupation des sols » (hors produits bois) et de l'autre « les produits bois ».

4.1.1.1. Collecte de stocks de carbone de référence

Concernant l'occupation des sols, des stocks de référence (exprimés en tonnes carbone par hectare¹³ : tC/ha) ont été définis pour chacun des réservoirs de carbone suivants : sol, litière, biomasse aérienne et racinaire. Les données des stocks de carbone des sols ont été obtenues à partir des travaux du Gis Sol et du réseau de mesure de la qualité des sols RMQS (échantillonnage réalisé entre 2001 et 2011) ; celles de la litière à partir du compte rendu de l'Académie d'agriculture de France (Vol. 85, n°6, 1999) ; celles de la biomasse hors forêts des travaux de l'IFN/FCBA/SOLAGRO « Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020 » (novembre 2009) ; celles de la biomasse racinaire des travaux de l'IGN « Puits de CO₂ des forêts françaises » (volet 1, 2018), disponibles à l'échelle des grandes régions écologiques (GRECO). Les données des stocks de carbone des produits bois (exprimées en teq CO₂) correspondent au sciage (bois d'œuvre), aux panneaux et papiers (bois d'industrie). Elles proviennent des estimations du CITEPA (2018) à l'échelle de la France.

4.1.1.2. Représentation de l'occupation des sols

À partir de la base de données Corine Land Cover (CLC), l'outil ALDO dispose d'une représentation de l'occupation des sols des EPCI français en 2006 et en 2012. Les surfaces sont exprimées en hectare et en pourcentage à l'échelle de l'EPCI. Les surfaces des différents types de forêt (feuillus, mixtes, conifères, peupleraies) sont calculées à partir de la BD forêt de l'IGN (2012-2016). Les surfaces des haies (associées aux activités agricoles) sont issues du croisement des données du registre parcellaire graphique (2012) et de la couche végétation de la BD TOPO de l'IGN, réalisé par l'Observatoire du développement rural de l'Inra (2018)¹⁴. Des estimations théoriques des récoltes totales en bois (bois d'œuvre et bois d'industrie) ont été calculées à l'échelle de la France et de l'EPCI en prenant en compte les pertes d'exploitation.

4.1.1.3. Calcul du stock total de carbone

Le stock de carbone par occupation de sol est obtenu par le produit du stock de référence et de la surface de l'occupation du sol (Figure 11). La distribution du stock de carbone des produits bois français par EPCI est calculée selon l'approche consommation (répartition selon habitants) : le stock de carbone des produits bois de l'EPCI est obtenu en multipliant le stock national de produits par la part de l'EPCI dans la population nationale. Enfin, le stock total de carbone (en tC et teq CO₂) est calculé à l'échelle de l'EPCI par addition des stocks totaux de chaque occupation du sol et au sein de chaque réservoir.

¹³ La tonne équivalent carbone (teq CO₂) est une unité permettant d'établir des bilans GES en comparant des gaz qui n'ont pas le même impact sur l'effet de serre

¹⁴ Les surfaces de haie sont entachées d'incertitudes en raison d'un changement de nomenclature de la BD TOPO entre sa création et aujourd'hui (ADEME, 2018)

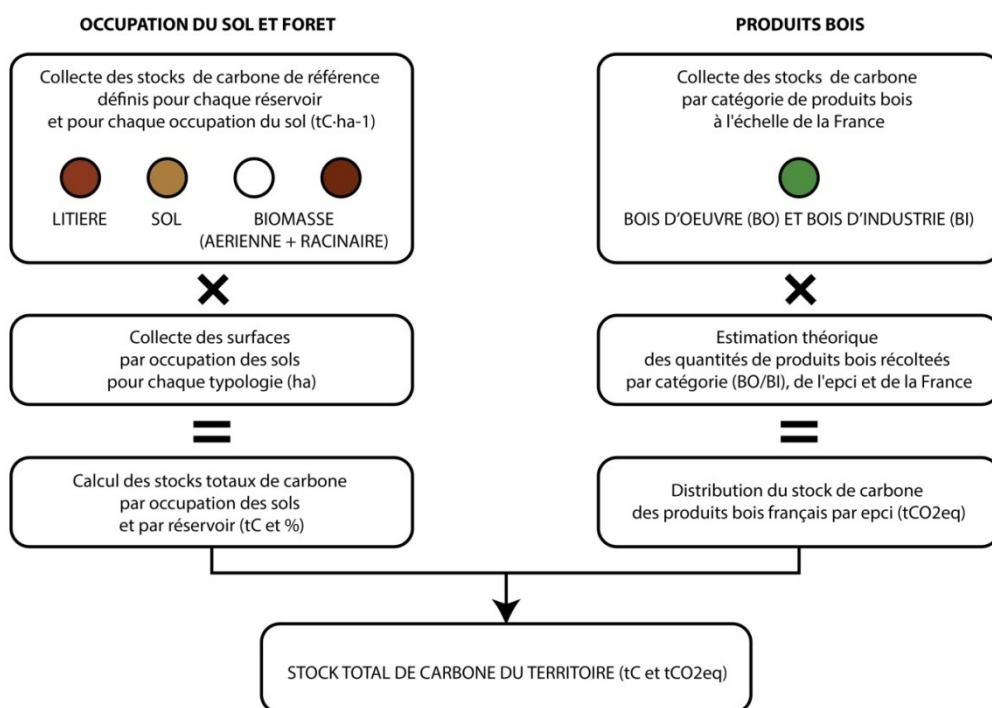


Figure 11. Méthode d'estimation du stock de carbone par occupation du sol à l'échelle de l'EPCI (d'après ADEME, 2018)

4.1.2. Calcul des flux de carbone

Le calcul des flux de référence de carbone distingue également l'occupation des sols (hors produits bois) des produits bois. Le flux de carbone de référence est une variation de stock entre une occupation du sol initiale et une occupation du sol finale par hectare pour les stockages et déstockages immédiats, et par hectare et par an pour les stockages et déstockages progressifs. Pour la biomasse forestière, les flux de référence sont calculés en soustrayant à la production biologique des forêts la mortalité et les prélèvements de bois.

4.1.2.1. Collecte de flux de carbone de référence

Concernant l'occupation des sols, comme pour les stocks, des flux de référence unitaire (exprimés en tC/ha/an ou tC/ha) ont été définis pour le sol, la litière, la biomasse aérienne et racinaire. Les données des flux de carbone des sols par changement d'affectation des sols et par zone pédoclimatique ont été obtenues à partir de la méthode de calcul développée par l'Inra dans Arrouays *et al.* (2002) ; celles de la litière et de la biomasse aérienne et racinaire hors forêts à partir des données nationales du CITEPA (guide Ominea, 2017) ; celles de la biomasse aérienne et racinaire des forêts à partir de l'inventaire forestier 2012-2016 de l'IGN (2018), disponibles à l'échelle des GRECO¹⁵. Concernant les données des flux de carbone dans les produits bois (exprimé en tC₂/an), elles correspondent aux estimations du CITEPA (guide Ominea, 2017).

4.1.2.2. Variations des surfaces et changement d'affectation des terres

Les variations de surfaces associées à chaque changement d'affectation du sol sont basées sur les changements observés entre les base données Corine Land Cover de 2006 et 2012. Pour les produits bois (bois d'œuvre et bois d'industrie), les récoltes totales sont calculées à l'échelle de la France et de

¹⁵ Pour la biomasse forestière, Les flux de référence sont calculés en soustrayant à la production biologique des forêts la mortalité et les prélèvements de bois (ADEME, 2018)

l'EPCI en prenant en compte les pertes d'exploitation. Celles-ci proviennent de données de prélèvements fournies par l'IGN croisées avec des proportions de récolte par catégorie de bois (BO/BI) régionales fournies par l'Agreste.

4.1.2.3. Calculs des flux de carbone par changement d'occupation des sols et par réservoir

Les flux totaux de carbone par changement d'occupation du sol par rapport à la composition forestière sont obtenus par le produit des flux unitaires en tC/ha/an ou tC/ha avec les variations de surfaces (ha/an) associées à chaque changement d'occupation du sol/occupation forestière correspondante (Figure 12). Le flux de CO₂ lié aux produits bois de l'EPCI est estimé par l'approche consommation (répartition selon nombre d'habitants) consistant à multiplier le stock national de produits par la part de l'EPCI dans la population nationale. Enfin, les flux totaux de carbone (exprimés en tC et teq CO₂) sont calculés par addition des flux totaux de chaque changement d'occupation du sol ou composition forestière et évolution des stocks de produits bois pour l'EPCI.

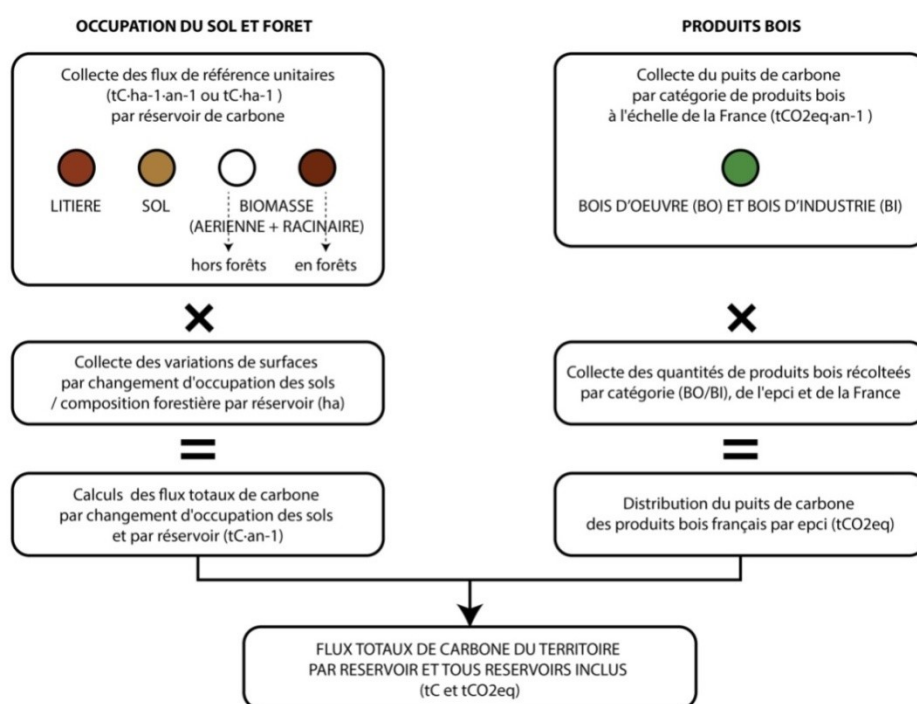


Figure 12. Méthode d'estimation du flux de carbone par occupation du sol à l'échelle de l'EPCI (d'après ADEME, 2018)

4.1.3. Pratiques agricoles

Diverses pratiques agricoles favorisant un accroissement potentiel des stocks de carbone des réservoirs sol et biomasse sont désormais identifiées. Mais l'impact de ces pratiques sur d'autres postes du bilan GES, comme les consommations d'énergies, les émissions de N₂O et de CH₄, et le potentiel de production d'énergies renouvelables, est à prendre en compte. Pour cela, l'outil ALDO s'est basé sur l'étude de l'Inra « *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?* » prenant en compte le potentiel d'accroissement des stocks de carbone, le potentiel d'atténuation d'autres GES, le coût technique de ces pratiques...

Au final, un flux de séquestration (en tC/ha) est estimé (Figure 13) en multipliant la surface associée à chaque pratique (à partir de données locales) par les valeurs de références nationales

d'accroissement des stocks de carbone en tonnes par hectare et par an pour les réservoirs sol et biomasse. Cet accroissement dure 20 ans avant atteinte d'une saturation.

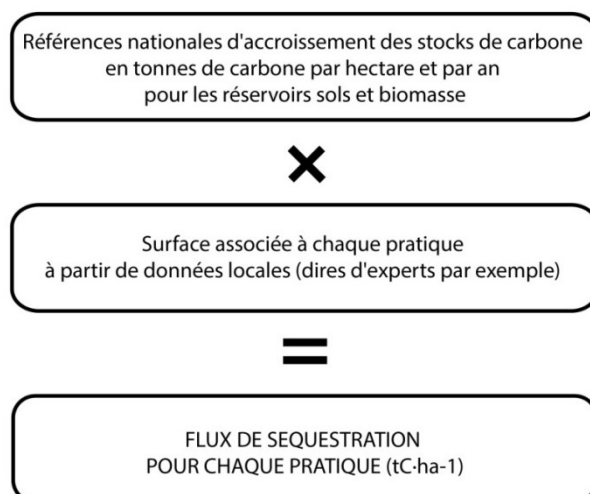


Figure 13. Méthode d'estimation du flux de carbone par occupation du sol à l'échelle de l'EPCI (d'après ADEME, 2018)

4.1.4. Dendrométrie

Les données dendrométriques¹⁶ sont compilées dans l'outil ALDO par composition forestière (par hectare) représentative de la grande région écologique (GRECO) de l'EPCI pour les peuplements de conifères, feuillus et mixtes, et par bassin populier pour les peupleraies (IGN, 2018).

4.2. Estimation de la séquestration du carbone sur la période actuelle récente à l'échelle de la MAMP

Afin de mieux saisir l'importance des données d'entrée, les stocks de carbone dans le sol et la biomasse sont comparés entre CLC 2012 et OCSOL 2014.

4.2.1. Comparaison des surfaces par occupation des sols entre Corine Land Cover 2012 et l'OCSOL régionale 2014

Par défaut, l'outil ALDO utilise les surfaces d'occupation des sols disponibles dans CLC 2012, dont la résolution spatiale est de 25 ha. Afin d'affiner les estimations réalisées par ALDO, des tests ont été réalisés en utilisant la base de données régionale OCSOL 2014 réalisée par le Centre régional d'information géographique régional (CRIGE PACA), disponible au 1/50 000^{ème}. Pour comparer les stocks et flux de carbone calculés à partir des différentes bases d'occupation des sols, des correspondances entre les typologies (Figure 14) des bases de données d'occupation du sol ont été créées.

Concernant la typologie sol (Figure 14, A), il existe de grands écarts entre CLC 2012 et l'OCSOL 2014 au niveau des classes « cultures » et « sols artificiels enherbés ». Pour la typologie biomasse (Figure 14, B), de forts écarts sont constatés au niveau des classes « cultures », « forêts mixtes » et « sols artificiels arbustifs ». Les surfaces agricoles données par CLC 2012 sont largement surestimées (deux fois plus) par rapport à celles données par l'OCSOL 2014. En revanche, CLC 2012 sous-estime largement la surface couverte par des sols artificiels enherbés par rapport à l'OCSOL 2014. Malgré

¹⁶ La dendrométrie consiste à suivre l'évolution du diamètre des arbres.

ces écarts, l'occupation des sols totale calculée à l'échelle de la MAMP à partir de CLC 2012 est de 309 997 ha contre 305 264 ha à partir de l'OCSOL 2014, soit un écart de 4733 ha (moins de 2 % de la surface totale de la métropole AMP).

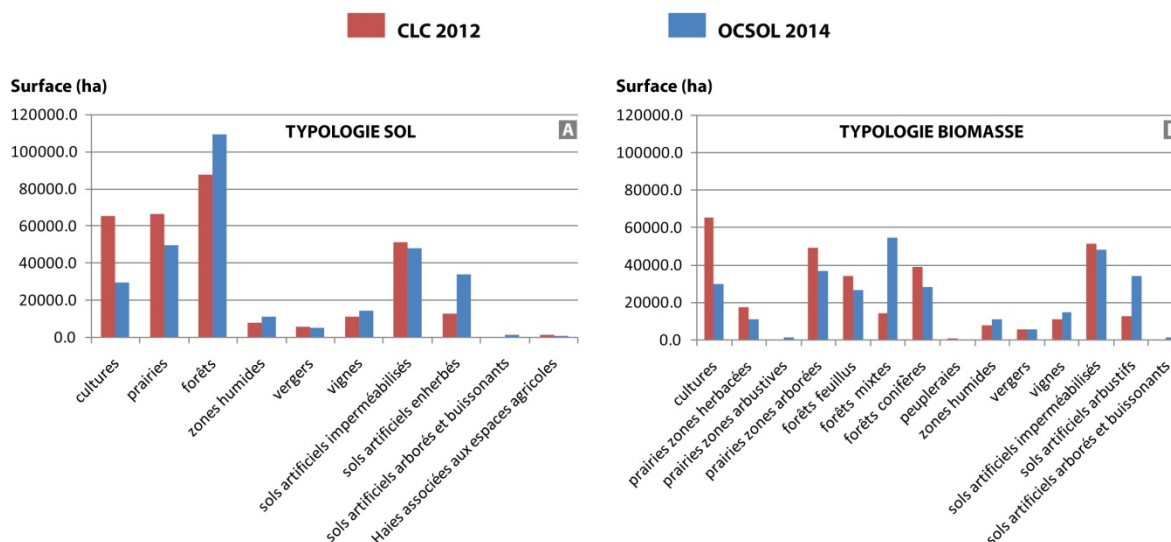


Figure 14. Surface par occupation du sol de l'EPCI (tous réservoirs inclus) en tC/ha entre CLC 2012 et l'OCSOL 2014 pour les typologies sol et biomasse

Ces différences ne reflètent pas un réel recul des surfaces agricoles ou une augmentation des forêts mixtes entre 2012 et 2014, mais peuvent probablement s'expliquer par la différence de résolution spatiale des images satellites¹⁷ ayant permis de constituer les bases de données ainsi que les chaînes de traitements utilisées pour caractériser l'occupation des sols. De plus, CLC 2012 reflète peu le phénomène de mitage très répandu en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur, alors qu'il est représenté dans l'OCSOL 2014 par la classe « Espaces de bâtis diffus et autres bâtis » recensant les zones de concentration de bâtiments en dehors des centres urbains, dispersées dans les zones agricoles et naturelles. Ainsi, sont soustraits des surfaces agricoles ces espaces bâtis dans CLC 2012. Le mitage urbain qui traduit une réalité terrain est donc représenté dans OCSOL 2014 et non dans CLC.

4.2.2. Stocks de carbone de référence estimés par occupation des sols

À l'échelle du territoire métropolitain, les occupations des sols (Figure 15) qui présentent le plus fort potentiel de stockage (> 100 tC/ha) sont les forêts (toutes catégories confondues), les prairies arborées, les zones humides et les espaces artificiels enherbés (dépendant du rapport entre les surfaces enherbées et imperméabilisées). À l'inverse, les occupations des sols peu « stockantes » sont les sols totalement imperméabilisés, les cultures, les vergers et les vignobles. Toutefois, la mixité de différentes pratiques, comme l'agroforesterie, permet d'augmenter le potentiel de stockage.

¹⁷ Image SPOT (6 m de résolution spatiale) pour l'OCSOL2014 et image LANDSAT (30 m de résolution spatiale) pour Corine Land Cover

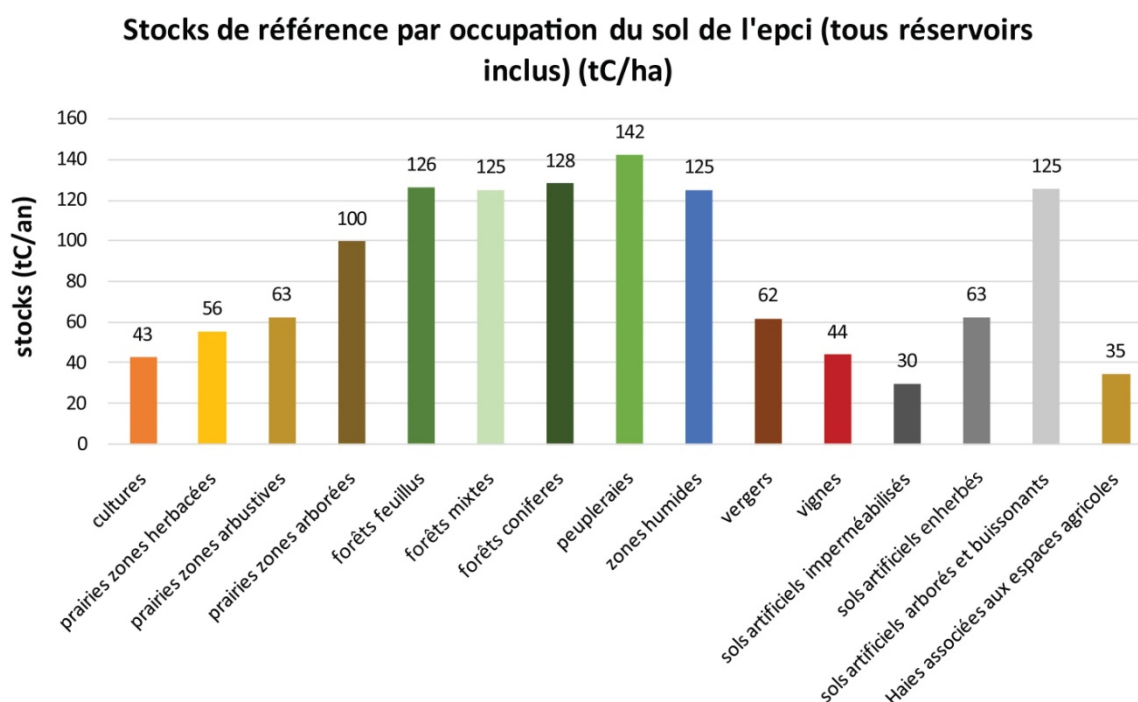


Figure 15. Stocks de référence (tC/ha) par occupation du sol de l'EPCI (tous réservoirs inclus)

4.2.3. Comparaison des stocks estimés par occupation des sols et par réservoir entre CLC 2012 et l'OCSOL 2014

Les différences dans la répartition des stocks de carbone (hors produits bois) dans les sols et la litière¹⁸, par occupation des sols à l'échelle de la métropole (Figure 16), proviennent des écarts de surface présentés précédemment. Ainsi, 12 % du carbone est stocké dans les sols agricoles d'après CLC 2012 (21 % de la surface totale) contre seulement 5 % d'après l'OCSOL 2014 (10 % de la surface totale). D'après CLC 2012, les prairies stockent près d'un quart du carbone à l'échelle de la métropole contre 17 % d'après l'OCSOL 2014. Les prairies sont donc très « stockantes » puisqu'elles représentent moins de 6 % de la surface totale. Les surfaces forestières stockent environ la moitié du carbone du territoire quelle que soit la base de données prise en compte (CLC 2012 : 47 % ; OCSOL 2014 : 54 %). Toutefois, la répartition du carbone par type de forêt est assez différente avec notamment 27 % du carbone stockés dans les forêts mixtes d'après l'OCSOL 2014 contre seulement 8 % d'après CLC 2012. Quant aux zones humides, malgré un stockage potentiel élevé (environ 125 tC/ha), elles présentent une trop faible surface (< 4 % de la surface totale) pour être considéré actuellement comme un environnement de stockage du carbone majeur à l'échelle de la métropole. Enfin, les sols artificiels enherbés (20 % d'herbe et 80 % de sols imperméabilisés¹⁹) représentent jusqu'à 8 % du stock de carbone d'après l'OCSOL 2014.

¹⁸ Les modélisations de stockage du carbone « hors produits bois » et « dans les sols et la litière » présentent des résultats très similaires, d'où le choix de ne présenter qu'un document sur deux. Les pourcentages de stockage « dans les sols et la litière » par occupation du sol peuvent toutefois être trouvés en Annexe 2

¹⁹ Valeurs choisies par défaut

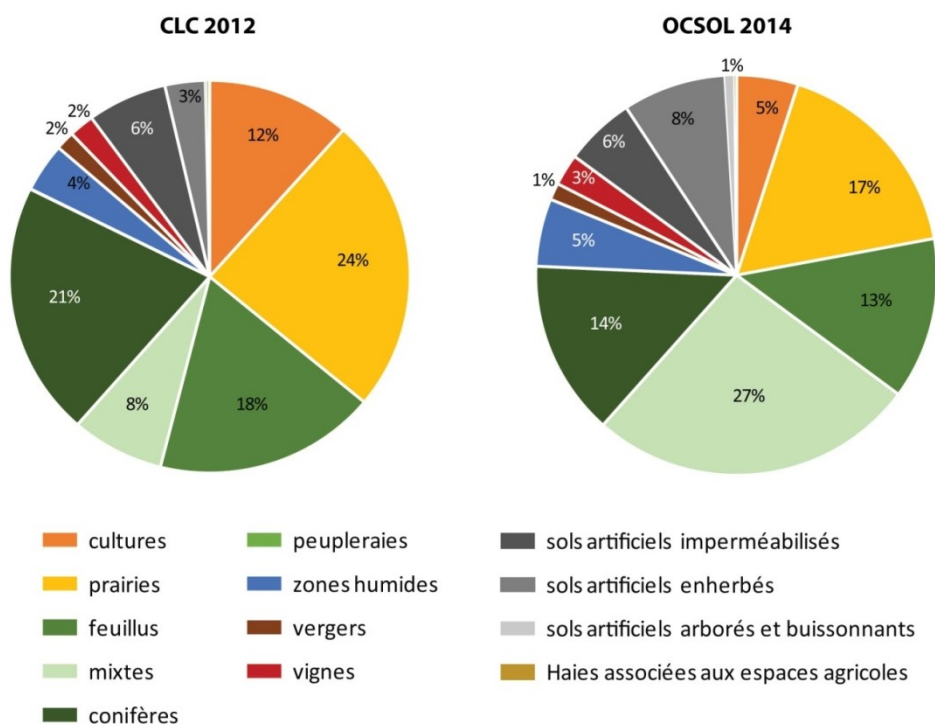


Figure 16. Répartition en pourcentage des stocks de carbone (hors produits bois) par occupation du sol de l'EPCI. Comparaison des résultats entre Corine Land Cover 2012 et OCSOL 2014

Le stockage (Figure 17) dans la biomasse concerne essentiellement quatre types d'occupation des sols : la prairie (tous types confondus), les forêts mixtes, les forêts de résineux et les forêts de feuillus. Les écarts entre CLC 2012 et OCSOL 2014 sont conséquents notamment au niveau de la prairie et des forêts mixtes.

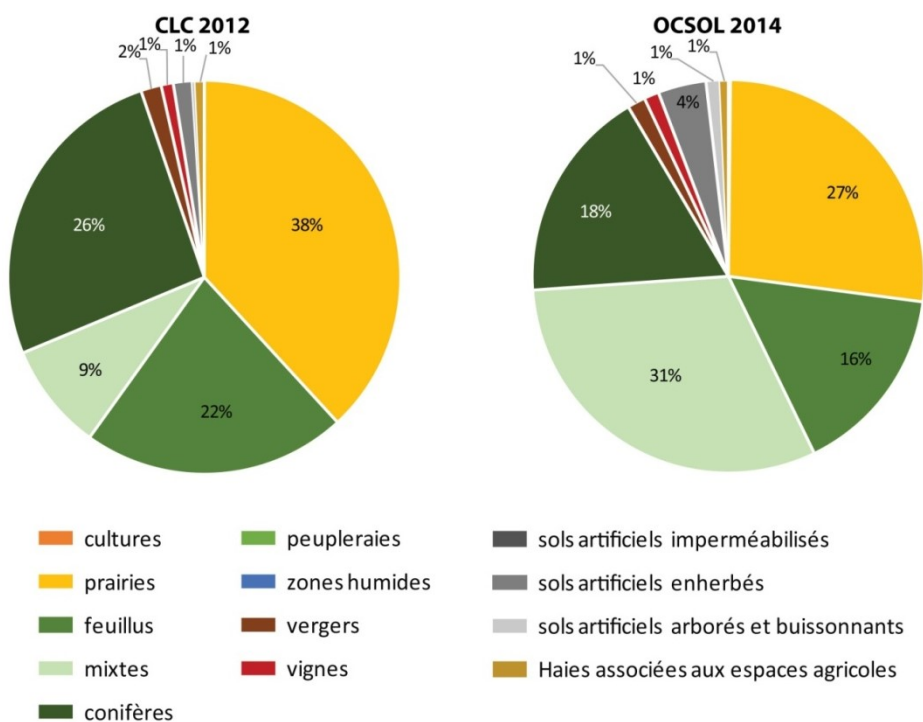


Figure 17. Répartition en pourcentage des stocks de carbone dans la biomasse par occupation du sol de l'EPCI. Comparaison des résultats entre Corine Land Cover 2012 et OCSOL 2014

D'ailleurs, ces dernières représentent le principal poste de stockage du carbone dans la biomasse (31 %) d'après l'OCSOL 2014 contre 9 % d'après CLC 2012. À l'inverse, la prairie (tous types compris) représente 38 % de stock de carbone par la biomasse d'après CLC 2012 contre seulement 27 % d'après OCSOL 2014. Enfin, sur la base d'OCSOL 2014, les sols artificiels enherbés représentent jusqu'à 4 % du stock de carbone par la biomasse, ce qui n'est pas négligeable et qui montre que les milieux urbanisés non totalement imperméabilisés ont également la capacité de stocker du carbone.

Remarque relative aux flux : les estimations de flux de carbone ayant été calculées à partir de l'évolution de l'occupation des sols de la métropole entre CLC 2006 et CLC 2012, les résultats sont présentés en Annexe 3.

4.3. Scénarios prospectifs à horizon 2040

Afin d'anticiper l'évolution de la séquestration du carbone à l'échelle du territoire métropolitain, trois scénarios basés sur l'évolution démographique sont proposés. Ils ont l'ambition de montrer que le stockage de carbone peut sensiblement différer selon les modes d'occupation des sols. Pour affiner les résultats, il conviendrait de travailler en lien direct avec les services de la métropole Aix-Marseille-Provence en charge des plans locaux d'urbanisme, du schéma de cohérence territoriale (SCoT), des espaces forestiers et agricoles, de l'environnement, du transport... Une concertation générale permettrait d'ajuster les scénarios prospectifs. Il conviendrait d'associer les acteurs territoriaux comme la Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, AtmoSud, les Communes forestières, l'Office national des forêts, les laboratoires de recherche (Inra ou UMR ESPACE par exemple...). En attendant, des tendances sont données à titre indicatif à l'horizon 2040, ce qui permet de se projeter sur plus de 20 ans, un délai raisonnable pour les politiques d'aménagement et la gouvernance.

4.3.1. Trois scénarios basés sur une évolution démographique virtuelle

Entre 1990 et 2009, la métropole AMP a connu une forte croissance démographique : +8000 habitants/an entre 1990 et 1999 et +12 200 hab./an entre 1999 et 2009. Cette dynamique a provoqué le développement de l'urbanisation au détriment des espaces agricoles (recul de deux tiers des surfaces entre 1990 et 2012) et naturels (recul d'un tiers des surfaces entre 1990 et 2012). Aujourd'hui, la métropole Aix-Marseille-Provence est la métropole régionale la plus peuplée de France (Grand Paris : environ 7 000 000 d'habitants) avec une population proche de 1 860 000 habitants (AGAM, 2017). Pourtant, le taux de croissance démographique actuel a largement baissé par rapport aux deux précédentes décennies et est désormais proche de celui de la Région Sud (environ 0,4 %). La MAMP est un territoire qui attire moins et qui est en concurrence avec les autres métropoles, notamment Montpellier Méditerranée et celles de la façade atlantique qui présentent une croissance démographique comprise entre 1 % et 1,7 % entre 2009 et 2014 (AGAM, 2017). Malgré ce ralentissement de la croissance démographique, la dynamique d'urbanisation a perduré dans le temps avec notamment un phénomène croissant d'étalement urbain et une hausse de la surface allouée aux zones d'activités et zones commerciales. Cet étalement urbain se caractérise par un tissu urbain discontinu, plus ou moins végétalisé, mais également par un mitage agricole dû à l'accaparement des terres arables pour le bâti résidentiel.

Au regard de l'évolution démographique actuelle, des ambitions démographiques de la métropole AMP et de celles du schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), trois scénarios prospectifs à horizon 2040 ont été testés (

Tableau 3). Le stockage de carbone a été calculé pour chaque scénario à partir de l'évolution potentielle des surfaces des différentes occupations des sols, l'objectif étant de répondre aux besoins

socio-économiques du territoire. L'évolution de l'occupation des sols a été estimée à partir des observations passées (*Atlas de l'environnement*, AGAM, 2017 ; *Dynamiques démographiques*, AGAM, 2017 ; *La Métropole Aix-Marseille-Provence face au défi du changement climatique*, GREC-SUD, 2018) et a été appliquée à l'OCSOL 2014 en prenant en compte la saturation progressive théorique du foncier urbanisable.

Scénario	Objectif de croissance démographique en % et par an	Nombre d'habitants par an	Nombre d'habitants supplémentaires entre 2017 et 2040	Nombre d'habitants en 2040
Scénario 1 : objectif MAMP	+8	16 300	374 000	2 234 100
Scénario 2 : objectif SRADDET	+5,5	10 900	250 100	2 110 000
Scénario 3 : dynamique ajustée	+4	7 800	180 000	2 040 000

Tableau 3. Scénarios d'évolution démographique à l'échelle du territoire métropolitain à horizon 2040

4.3.2 Changements d'affectation des sols entre aujourd'hui et 2040 selon les scénarios

Au regard de l'occupation des sols actuelle (Figure 18, OCSOL 2014), une dichotomie nord-sud se dégage à l'échelle du territoire de la MAMP : d'un côté le Pays de Martigues, Marseille, le Pays d'Aubagne et de l'Étoile disposant de peu d'espaces agricoles appropriables par l'urbanisation et qui paraissent voués à une densification des pôles urbains existants ; de l'autre, le Pays d'Aix-en-Provence, le Pays salonais et Istres-Ouest-Provence qui disposent *a contrario* de grandes surfaces agricoles et de terres arables. Toutefois, si les vignobles, les cultures irriguées permanentes et l'arboriculture sont conservés à l'avenir, l'espace urbanisable (en dehors des grands centres urbains et des espaces naturels protégés) se situe entre l'est de Salon-de-Provence, le nord d'Aix-en-Provence et la vallée de la Durance.

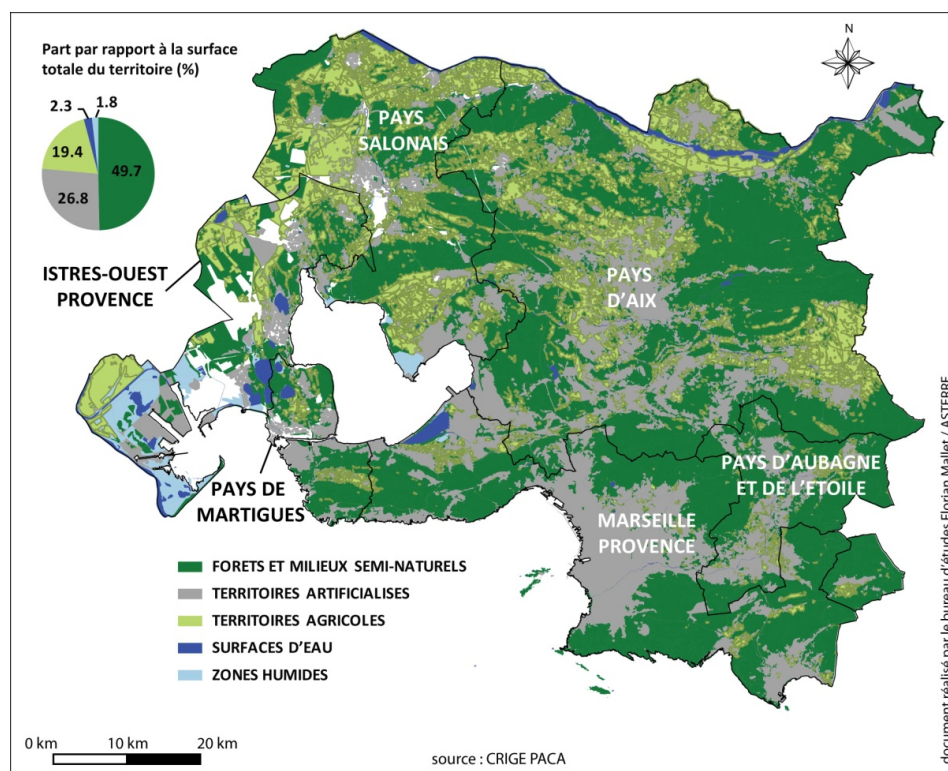


Figure 18. Représentation simplifiée (niveau 1) de l'OCSOL 2014 à l'échelle de la MAMP

La section suivante présente les grandes lignes de mutations de l'espace métropolitain, scénario par scénario. Le détail des variations de surface (positive ou négative) par occupation du sol est précisé dans la Figure 19. Les changements d'affectation des sols en surface et entre occupation du sol par scénario sont donnés en Annexe 4. Cette phase est purement exploratoire et les pourcentages d'évolution de l'occupation des sols proposés ici sont hypothétiques. Enfin, pour éviter d'accroître les incertitudes liées aux changements d'occupation des sols, les écarts bruts de stock et de flux entre 2017 et 2040 sont calculés sans incrémenter les évolutions année après année. En privilégiant un comparatif entre deux horizons (2017 et 2040), les incertitudes ne concernent que les surfaces soumises à un changement d'affectation des sols entre deux dates.

Les trois types de scénarios prospectifs à l'étude :

- scénario 1, objectif démographique de la MAMP : une croissance démographique de 8 % par an reviendrait à accueillir environ 374 000 nouveaux habitants à horizon 2040, ce qui aggraverait l'étalement urbain, si les logiques urbaines, foncières, économiques, environnementales, politiques, et en conséquence les besoins et contraintes des habitants ne bifurquent pas. Pour atteindre cet objectif, une mutation de 10 % de la surface totale de la métropole permettrait d'absorber cette croissance démographique. Ce chiffre de 10 % représente une surface de 300 km² (soit la surface cumulée des villes de Marseille et d'Aubagne) qui serait urbanisée au détriment des terres arables et des piémonts arbustifs (prairies, garrigues) et forestiers non protégés ayant une faible valeur patrimoniale. Si les centres urbains actuels ne se densifient pas et si les nouveaux arrivants s'installent sur ces 300 km², la densité de cette « nouvelle » population serait d'environ 1250 hab./km² ;
- scénario 2, objectif démographique du SRADDET : une croissance démographique de 5,5 % par an (objectif SRADDET) se traduirait par l'arrivée d'environ 250 100 nouveaux habitants à horizon 2040. Dans ce scénario, la densification et la verticalité des pôles urbains seraient encouragées afin de limiter le grignotage des espaces agricoles, forestiers et semi-naturels, l'étalement urbain, le transport (domicile-travail, domicile-commerce, domicile-santé par exemple)... Dans ces conditions théoriques qui exigeraient de repenser les espaces métropolitains, notamment la ville et ses réseaux périphériques multi-échelles, de privilégier des mutations favorisant la réduction des émissions de GES, d'économiser de l'espace, il serait nécessaire d'urbaniser 1 % du territoire métropolitain, soit environ 30 km², la superficie de Sénas, Fuveau ou encore La Ciotat. Ce scénario n'affecte pas les espaces naturels actuels, mais accroît la densité de la population au cœur des pôles urbains tout en augmentant la surface des espaces verts en milieu urbain. Les 30 km² urbanisés couvriraient des terres agricoles les moins fertiles. En termes d'emprise géographique, ce scénario ne révolutionnerait pas la situation actuelle, même si l'urbanisation gagnait en réalité 2 ou 3 % ;
- scénario 3, dynamique démographique ajustée : une croissance démographique de 4 % par an (tendance actuelle) porterait la population totale à environ 2 040 000 habitants en 2040 soit 180 000 habitants supplémentaires par rapport à 2017. À l'inverse du scénario 1, celui-ci préconise une augmentation de la surface occupée par les espaces naturels au détriment des espaces imperméabilisés. Pour cela, les objectifs principaux sont de mettre en place une politique de densification urbaine ambitieuse (verticalité, occupation des logements vides dans les cœurs urbains...). Afin de lutter contre l'étalement urbain, d'augmenter la nature en ville en favorisant les parcs urbains, l'agriculture urbaine, les jardins partagés, et de transformer en espaces naturels (notamment ceux qui stockent le plus de carbone dans les sols et la biomasse : forêts et prairies arbustives) les friches industrielles ou les espaces industriels jouant un rôle mineur ou marginal dans le dynamisme économique et social de la métropole et par extension de la Région Sud. Cette démarche vise à atténuer de manière forte les émissions

de GES en augmentant d'au moins 10 % le stockage de carbone actuel à l'échelle de la métropole d'ici 2040.

Ces trois scénarios sont volontairement schématiques et différents, et dépendent des engagements politiques, économiques, financiers, environnementaux et sociaux à l'échelle territoriale, régionale et nationale. Pour la mise en œuvre de ces scénarios, il serait indispensable de mobiliser tous les acteurs métropolitains volontaires pour imaginer le territoire de demain, à la fois désirable, résilient et faiblement émetteur de GES, et ce, en toute transparence et en s'appuyant sur les connaissances des collectivités, des laboratoires de recherche, des bureaux d'études...

Pour mieux saisir les changements d'affectation des sols en fonction des trois scénarios²⁰, cette illustration indique les évolutions en pourcentage (Figure 19) :

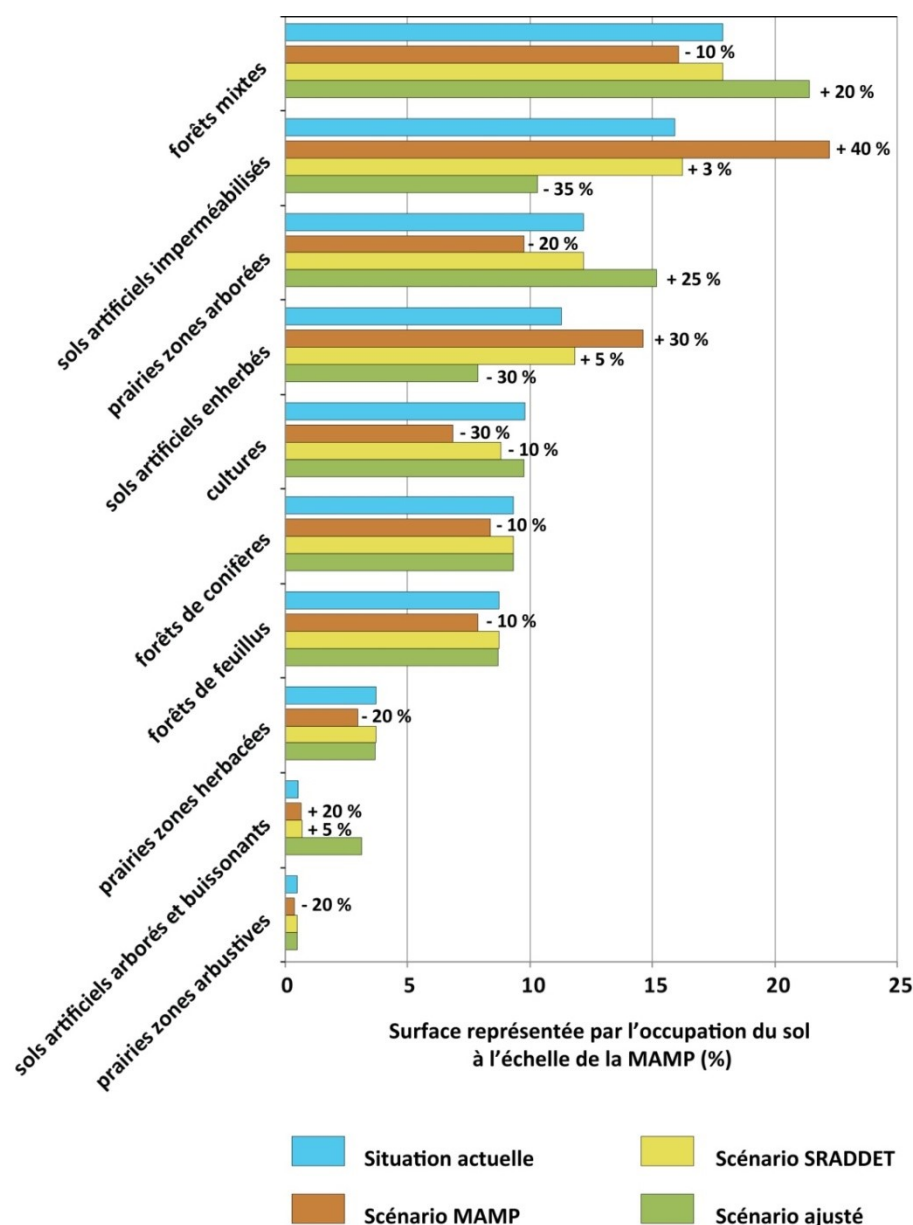


Figure 19. Changements d'affectation des sols potentiels en fonction des scénarios démographiques étudiés. Les évolutions sont calculées (en %) par rapport à l'occupation des sols actuelle (OCSOL 2014)

²⁰ Le détail des mutations entre les types d'occupation du sol est donné en Annexe 4

4.3.3. Effets des changements d'affectation sur la séquestration de carbone

Les résultats sont déclinés par scénario :

- scénario 1, objectif démographique de la MAMP : ce scénario est à éviter dans la mesure où les espaces agricoles, forestiers et semi-naturels reculeraient, se traduisant par une baisse du stock de carbone d'environ 1 400 000 tonnes à l'échelle de la métropole par rapport à aujourd'hui (Tableau 4). Dans le contexte actuel, ce choix serait irresponsable et entraînerait de trop grandes mutations au sein de l'espace métropolitain. Au regard des nombreux espaces protégés (PNR, ZNIEFF, Natura 2000, etc.) et réglementés en termes de changement d'occupation des sols, les pressions sur le foncier à bâtir seraient très fortes et inégalement réparties sur le territoire. La grande perte de biodiversité associée à la disparition des surfaces forestières et de prairies provoquerait un appauvrissement des sols, une hausse de l'érosion et une plus grande vulnérabilité face aux aléas naturels. L'imperméabilisation des sols liée à la périurbanisation augmenterait le phénomène de ruissellement et accentuerait le risque inondation dans des communes actuellement peu vulnérables face à cet aléa. Enfin, ce scénario est très éloigné de la tendance démographique actuelle, et en ce sens, il paraît utopique ;
- scénario 2, objectif démographique du SRADDET : ce scénario est moins « agressif » que le précédent, mais également éloigné de la dynamique démographique actuelle. Ce choix raisonnable sur le papier permet de préserver les terres agricoles et forestières, de contenir l'urbanisation (1 % d'évolution tout en accueillant 250 100 nouveaux habitants d'ici 2040), tout en améliorant légèrement le stock de carbone actuel (Tableau 4). La densification et la verticalité des pôles urbains seraient indispensables pour limiter au maximum l'étalement urbain. Ce scénario contraignant en termes urbanistiques (repenser la ville et sa structure), mais permettant d'augmenter le stockage de carbone, n'est toutefois pas satisfaisant car le PCAEM vise à optimiser le potentiel de séquestration des sols agricoles et forestiers pour réduire les émissions de GES. Les bénéfices liés à la préservation de la biodiversité en conservant les espaces semi-naturels seraient par ailleurs réels ;
- scénario 3, dynamique démographique ajustée : suivant la tendance démographique actuelle, ce scénario est plus vertueux car il renforce significativement la séquestration du carbone, ce qui répond à la nécessité de réduire les GES. Cette action d'atténuation passe par l'augmentation des espaces semi-naturels « stockants » (forêts et prairies arbustives), la densification des villes, la végétation des espaces urbains et périurbains. Ce scénario permet d'élargir la « zone tampon » entre les espaces semi-naturels, agricoles et urbains sans pour autant interrompre les interactions entre l'homme et la nature. Il préserve la biodiversité et protège les corridors écologiques nécessaires au déplacement, à l'alimentation et à la reproduction de la faune et de la flore locale. Si des efforts sont menés parallèlement pour accroître la nature en ville, les milieux urbains et les populations bénéficieront également des bienfaits apportés par des services écosystémiques, notamment en termes de stockage du carbone par la biomasse. En 2040, la séquestration du carbone de carbone bondirait de 12 %, soit près de 8 000 000 teq CO₂ supplémentaires. Comme le scénario 2, repenser la ville, en particulier les bassins d'emploi et d'activités, le transport et les espaces de loisirs, serait obligatoire, mais cette démarche est positive pour l'homme et la nature : meilleure qualité de la vie, confort et santé des habitants, pollution de l'air plus faible, protection de l'atmosphère, création d'emplois, développement d'une économie innovante, attractivité du territoire (à moduler en fonction des objectifs de réduction de GES)... Ce scénario n'est qu'une ébauche montrant ses bienfaits en termes de séquestration du carbone. Il doit être bonifié et faire appel à toutes les compétences locales pour le rendre crédible et réalisable.

	Stock brut de carbone (en tC)	Stock de carbone (teq CO ₂)	Flux de carbone (tC)
Situation actuelle (OCSOL 2014)	29 162 785	106 930 212	non renseigné : correspond à l'évolution entre CLC 2006 et 2012
Scénario 1 : objectif MAMP	27 784 805	101 877 617	entre -1 036 686 et -682 500*
Scénario 2 : objectif régional SRADET	29 231 282	107 181 369	35 060
Scénario 3 : dynamique ajustée	31 287 220	114 719 808	entre* 118 690 et 135 250

Tableau 4. Stock (tous réservoirs) et flux (hors produits bois) de carbone à l'échelle métropolitaine selon les différents scénarios de croissance démographique en 2040. *Les flux peuvent varier selon le type de prairie pris en compte dans les changements d'affectation des sols.

L'estimation des flux de carbone annuels entre aujourd'hui et 2040 est entachée d'incertitudes puisqu'elle ne prend pas en compte les produits bois et qu'elle est basée sur des changements d'affectation des sols choisis arbitrairement. À titre d'exemple, le passage d'un hectare de forêt en zones imperméabilisées n'entraîne pas le même flux que le passage d'un hectare de parcelle agricole en zones imperméabilisées. Ces précisions ne sont malheureusement pas disponibles actuellement. Les différences entre les scénarios sont assez notables entre un stockage amoindri de plus d'un million de tonnes selon le scénario 1 et une séquestration additionnelle comprise en 30 000 et 45 000 tC selon les scénarios 2 et 3.



Parc du 26^{ème} centenaire, ©Justine Gabriel

Conclusion et recommandations générales

La séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers représente un puissant levier pour limiter les gaz à effet de serre dans l'atmosphère et par conséquent les impacts du changement climatique. Renforcer le stockage du carbone est une piste d'atténuation crédible à consolider avec de fortes mesures d'adaptation au changement climatique. Cette action nécessite des changements de pratiques dans la gestion des espaces forestiers et agricoles, et parfois une réorganisation des usages des sols et de l'espace, mais cette mutation des pratiques et des paysages n'est pas un frein à l'attractivité et au dynamisme de la métropole Aix-Marseille-Provence. Favoriser la séquestration revient à entrer dans une boucle vertueuse qui profite à tous : maintenir les forêts, préserver et valoriser des paysages méditerranéens si séduisants, diminuer la pollution de l'air, éviter la dispersion de l'habitat et limiter le transport, privilégier la santé des sols et de la biomasse, protéger la biodiversité, la faune et la flore, améliorer la santé de l'homme, développer l'agriculture de proximité et les circuits courts, réduire les pesticides et les intrants chimiques, soutenir la permaculture, créer des emplois et consolider l'économie, favoriser la filière bois et la construction avec des produits locaux, remettre la nature au cœur des pôles urbains, garantir des espaces de loisirs de qualité, réhabiliter le patrimoine agricole et forestier, créer du lien entre les agriculteurs, les forestiers et les habitants, conserver les forêts anciennes tout en laissant la place à de jeunes peuplements, augmenter la résilience des milieux agricoles et forestiers, limiter les îlots de chaleur urbains... Cette boucle vertueuse est en réalité une approche systémique positive qui interagit entre les secteurs économiques, sociaux et environnementaux. Ces actions énumérées ont la capacité de mobiliser toutes les acteurs territoriaux et tout particulièrement les citoyens qui peuvent accélérer le processus en acceptant les transformations et en incitant les décideurs à adopter des politiques qui dépassent le court terme sans renier le présent. L'adhésion collective est l'une des clés de la réussite. Des projets peuvent émerger sous l'impulsion des collectivités et d'initiatives citoyennes. Réussir la séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers, c'est contribuer au succès de la politique d'atténuation et d'adaptation, c'est basculer dans la transition énergétique et écologique, c'est une manière de rendre son territoire désirable aujourd'hui et demain sans desservir son développement et altérer son intégrité.

Le potentiel de séquestration du carbone est réel à l'échelle métropolitaine, mais il existe aujourd'hui des freins et des obstacles qu'il faut surmonter. L'estimation du carbone dans les sols agricoles et forestiers reste difficile et sujette à des approximations. Estimer un potentiel d'un sol en fonction de sa composition, sa profondeur, son système racinaire, sa litière, sa biomasse aérienne, son état de santé n'est pas aisé. Il faut encourager et multiplier les mesures *in situ* pour mieux évaluer la séquestration à l'échelle parcellaire et intraparcellaire. Une meilleure connaissance de son territoire et de ses caractéristiques physiques et biologiques est nécessaire. Les acquis scientifiques sont à la fois avancés et limités en raison du manque d'études locales. Des outils de modélisation permettent de s'affranchir des données manquantes, mais les simulations sont encore entachées d'erreurs. La fourchette d'incertitudes est parfois grande sachant que le paramétrage s'appuie parfois sur des données régionales qui ne sont pas toujours pertinentes à l'échelle locale. Cela ne doit pas empêcher la mise en œuvre d'actions en faveur de la séquestration du carbone. Il ne faut pas attendre d'obtenir des résultats parfaitement fiables et adaptés à chaque contexte pour progresser et contribuer à la baisse des GES dans l'atmosphère.

Les sols agricoles et forestiers n'ont pas vocation à compenser les émissions de carbone issues des autres secteurs. Penser que l'agriculture et la forêt limiteront à elles-seules les effets du changement climatique serait une erreur : la ville et sa périphérie doivent également se réinventer en émettant moins de polluants, les écosystèmes marins et les zones humides ne doivent pas être dégradés, les industries, malgré leurs efforts en matière de pollution de l'air, doivent se transformer... Tout est lié,

ce qui permet de mettre en place des politiques cohérentes et efficaces, et des processus de co-construction éprouvés et créatifs.

Un autre écueil est la rapidité du changement climatique en cours : si les réductions de GES dans l'atmosphère tardent, les conditions climatiques deviendront très contraignantes avec une hausse constante de la température, des printemps et des étés très chauds, des événements extrêmes plus fréquents (sécheresse, canicule, épisodes de pluies intenses, incendies...). La variabilité climatique interannuelle est aussi un facteur déterminant. En d'autres termes, plus le temps passe, plus il sera difficile de développer la végétalisation, de conserver une agriculture diversifiée, de maintenir la diversité des espèces forestières, d'accéder à l'eau... Les décideurs peuvent élaborer les meilleurs scénarios pour le développement harmonieux de la métropole, mais si les contraintes deviennent trop grandes, les projets ambitieux de séquestration du carbone deviendront caducs.

Les outils opérationnels pour évaluer la séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers peuvent être améliorés par l'incrémentation de valeurs de stock et de flux unitaire de carbone correspondant au territoire sur lequel les estimations sont effectuées. Plus ces valeurs unitaires représentent des échelles fines, plus les estimations sont précises. L'obtention de ces données doit faire l'objet de collaboration entre les services de l'État et le monde scientifique. Le financement de sites « pilotes » où l'évolution des stocks de carbone peut être suivie en continu est indispensable pour obtenir des données dans des contextes variés. De cette façon, il serait également possible d'expérimenter des changements d'occupation des sols et observer la dynamique de stockage/déstockage en contexte méditerranéen. Disposer d'un observatoire du carbone en région Sud, ouvert à tous, permettrait une meilleure connaissance et maîtrise du sujet par les acteurs territoriaux. La formation aux outils de mesure du carbone et aux modèles d'estimation des flux est indispensable pour prendre en compte efficacement la séquestration du carbone dans les plans réglementaires. En outre, il est indispensable de disposer d'une connaissance et d'une cartographie de l'occupation des sols la plus fine et récente possible. Ainsi, la combinaison de mesures de stock et de flux à échelle fine, et d'une occupation du sol précise et locale doit permettre d'améliorer l'estimation de la séquestration du carbone dans les sols et la biomasse. La production du mode d'occupation du sol (MOS) de la métropole Aix-Marseille-Provence va débuter sous le contrôle du Centre régional d'information géographique (CRIGE-PACA). D'ici deux ans, le MOS métropolitain sera disponible à très haute résolution spatiale ce qui permettra d'affiner les analyses.

La métropole Aix-Marseille-Provence a les moyens de renforcer la séquestration du carbone. C'est une question de volonté politique, économique et sociale. Si la périurbanisation ralentit, si les pôles urbains se densifient et gagnent en verticalité, sans pourtant multiplier les hauts immeubles, si la végétalisation, les jardins partagés et l'agriculture urbaine sont privilégiés, si les déplacements sont limités entre les principales zones d'intérêt des habitants et usagers, par exemple, les espaces urbanisés en 2040 seraient susceptibles de ne progresser que d'un ou deux pour cent. Les scénarios étudiés le montrent. Construire des scénarios prospectifs métropolitains robustes, basés sur des indicateurs chiffrés fiables délivrés par les services techniques de l'EPCI et les principaux acteurs territoriaux (chambre d'agriculture départementale, association agréée de surveillance de la qualité de l'air, collectivités, gestionnaires forestiers, agences d'urbanisme...), capables d'atteindre des objectifs ambitieux et réalistes, est indispensable pour mieux évaluer la séquestration et les flux de carbone à l'avenir. Une concertation collective, associant des élus et des citoyens, serait la bienvenue.

Et même si les émissions des GES à l'échelle métropolitaine représentent un très faible pourcentage des émissions mondiales, il est primordial que l'EPCI participe activement à l'effort collectif par solidarité et exemplarité. Un lien étroit avec les métropoles françaises et mondiales servirait à partager les expériences.

Pour conclure, une série de pistes susceptibles de renforcer la séquestration dans les sols agricoles et forestiers de la métropole est volontairement listée en fin de rapport pour encourager les acteurs territoriaux à agir :

- maintenir et développer les prairies permanentes et temporaires (rotations) ;
- convertir les terres arables en prairies permanentes : cela permet de stocker deux fois plus de carbone ;
- changer les pratiques agricoles et d'élevage : par exemple, nourrir les vaches à l'herbe entraîne une réduction des surfaces en cultures annuelles au profit des prairies ;
- pratiquer des rotations incluant des légumineuses ;
- de manière générale, préserver et protéger les sols agricoles ;
- restaurer les restanques pour enrichir les sols (cultures, forêts) ;
- maintenir, planter, et valoriser les haies ;
- réduire le travail du sol ;
- réduire les apports d'azote de synthèse (leur fabrication contribue aux émissions de CO₂) ;
- favoriser l'agriculture biologique pour limiter les intrants et préserver la santé des sols ;
- semer des engrais verts ;
- effectuer des amendements pour améliorer les propriétés physiques des sols ;
- apporter des produits résiduels organiques ;
- éviter l'irrigation excessive qui a tendance à déstocker le carbone et à émettre du protoxyde d'azote ;
- encourager le mulch ou paillis pour protéger les sols, et le compostage : l'application de compost sur les pâturages, par exemple, améliore l'absorption et la fixation du carbone dans les sols ;
- accroître la couverture des sols afin d'augmenter la quantité de matière organique et ainsi l'épaisseur des sols ;
- enherber de manière permanente les vignobles et augmenter la surface enherbée des cultures en général ;
- restaurer les terres dégradées, notamment les espaces ouverts (garrigues par exemple) ;
- restaurer les prairies dégradées pour leur donner un caractère vivace. Certaines prendraient la forme de savanes, composées d'arbustes et d'arbres, pouvant stocker durablement du carbone ;
- développer l'agroforesterie : associer des arbres aux cultures et/ou à l'élevage ;
- éviter d'urbaniser les espaces forestiers afin d'éviter de déstocker immédiatement des volumes importants de CO₂ par hectare (biomasse + sol) ;
- maintenir les forêts anciennes tout en favorisant le développement de jeunes peuplements plus résistants aux extrêmes climatiques ;
- assurer la régénération après exploitation forestière ;
- restaurer les forêts dégradées ;
- convertir les taillis en futaies et améliorer les accrues forestières²¹ ;
- afforester en limitant les changements d'affectation des sols ;
- favoriser la mise en place de zonages réglementaires et la protection des « vieux arbres » ;
- favoriser les îlots de sénescence ;
- développer la filière bois-énergie-matériau en favorisant l'approvisionnement local et la gestion forestière durable ;
- développer les « systèmes Keyline » visant à rétablir et augmenter la profondeur et la fertilité du sol, tout en renforçant ses capacités à conserver l'eau. Ces techniques s'inspirent des modèles naturels (biomimétisme).

²¹ Peuplement forestier obtenu par la colonisation naturelle d'un terrain dont l'utilisation précédente a été abandonnée (déprise des terres agricoles), définition CNPF

Toutes ces actions (liste non exhaustive) entrent directement dans les politiques d'atténuation des GES et d'adaptation au changement climatique. Certaines pratiques sont plus efficaces que d'autres (favoriser les prairies permanentes et gérer les forêts par exemple), mais elles ne sont pas hiérarchisées de manière intentionnelle pour montrer que chacune, sans exception, peut apporter sa contribution. Pour optimiser la séquestration du carbone, il est ainsi judicieux de toutes les mettre en œuvre. Stocker plus de carbone va de pair avec une réduction massive des GES dans l'atmosphère. À l'échelle mondiale, la séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers a un rôle déterminant à jouer, mais ces derniers ne seront bien sûr pas en mesure d'absorber tous les GES émis par les activités humaines.

Enfin, le rapprochement avec l'ADEME au niveau national, dont le siège se situe à Angers, a permis de nouer des premiers liens. L'ADEME et son groupe national composé d'experts sur la séquestration du carbone sont preneurs de tout partage d'expériences sur l'utilisation de l'outil ALDO à l'échelle territoriale. Une collaboration entre l'ADEME, le GREC-SUD et la métropole Aix-Marseille-Provence a été évoquée pour améliorer les fonctionnalités de l'outil ALDO et les connaissances, et parfaire les résultats à échelle fine. Ce partenariat pourrait être expérimenté jusqu'à la révision du PCAEM dans 3 ans.

Sources

ADEME, 2018, *Notice technique ALDO : estimation des stocks et des flux de carbone des sols, des forêts et des produits bois à l'échelle d'un EPCI*

www.territoires-

climat.ademe.fr/Uploads/media/default/0001/01/16c8f3d7a61570edc7a0cef821828f2208e59270.pdf

AGAM, *Aix-Marseille-Provence, un capital nature et littoral à partager*, Atlas de l'environnement 2017 | Tome 1, décembre 2017

AGAM, *Dynamique démographique : quels enjeux sur la métropole AMP ?* mars 2017, n°57

www.agam.org/fileadmin/ressources/agam.org/publications/Regards/Regards_de_l_Agam_n_57_-_SOCIETE_-_Dynamique_demographique_-_quels_enjeux_sur_la_metropole_AMP.pdf

Alterre Bourgogne, *Stockage naturel du carbone*, rapport technique, octobre 2008

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P., 2002, *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'Inra à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, octobre 2002, 36 pages

inra.dam.front.pad.brainsonic.com/ressources/afile/225455-e2ffa-resource-synthese-en-francais.html

Arrouays et al., 2002, *Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* Rapport d'expertise réalisé par l'Inra à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, octobre 2002, 334 p

Balesdent J., 1996, *Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France*, Étude et Gestion des Sols, 3, 4, p 245-260

Bellamy et al., 2005, *L'effet de serre se nourrit jusqu'au sol*, Nature, septembre 2005

Cahiers du GREC-SUD (www.grec-sud.fr) édités par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR Climat) :

- *La séquestration naturelle du carbone en région Sud Provence-Alpes*, 2019 (en cours de publication)
- *La Métropole Aix-Marseille-Provence face au défi du changement climatique*, 2018
- *Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, 2016
- *Les effets du changement climatique sur l'agriculture et la forêt en Provence-Alpes-Côte d'Azur*, 2016
- *Provence-Alpes-Côte d'Azur, une région face au changement climatique*, 2015

Cardinael R., Umulisa V., Toudert A., Olivier A., Bockel L., Bernoux M., Revisiting, 2018, *IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems*, Environmental Research Letters, 13(124020)

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaeb5f>

Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colnenne C., Metay A., 2014, *Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France*, Innovations Agronomiques 37, 23-37

www6.inra.fr/ciag/content/download/5353/41503/file/Vol37-3-Chenu.pdf

Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R.B., Piao S., Thornton P., 2013, *Carbon and Other*

Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

ClimAgri : guide méthodologique, 2016

www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/climagri-guidemethodologique_v916.pdf

ClimAgri métropolitain AMPM : comment faire évoluer les pratiques et les productions agricoles, 2018, Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, comité technique PCAEM

Freibauer A., Rounsevell M. A., Smith P., Verhagen A., 2004, *Carbon sequestration in European agricultural soils. Geoderma*, 122, 1-23. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.01.021

Guide PCAET : comprendre, construire et mettre en œuvre, 2016, ADEME

www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pcaet-comprendre-construire-et-mettre-en-oeuvre.pdf

Nasi R., Mayaux P., Devers D., Bayol N., Eba'a Atyi R., Mugnier A., Cassagne B., Billand A., Sonwa D.J., 2009, *Un aperçu des stocks de carbone et leurs variations dans les forêts du bassin du Congo*, Les forêts du bassin du Congo: état des forêts 2008, de Wasseige C. et al. (eds.), 199-216
URL <http://agritrop.cirad.fr/552292/> (accessed 1.14.19)

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013, *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*, Synthèse du rapport d'étude, Inra, 92 p.

Rusco E.R, Jones and Bidoglio G., 2001, *Organic matter in the soils of Europe: Present status and future trends*, European Soil Bureau Soil and Waste Unit, Institute for Environment and Sustainability, JRC Ispra, 15 p

Smith P., Powlson D. S., Smith, J. U., Falloon, P. D., & Coleman, K., 2000, *Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture*, *Global Change Biology*, 6(5), 525-539. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00331.x

Vallet P., 2006, *Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers*, Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle, 209 p

Vleeshouwers L.M., Verhagen A., 2002, *Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe*, *Global Change Biology* 8 (2002), p 519-530. ISSN 1354-1013

West T.O., Post W.M., 2002, *Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation*, *Soil Science Society of America Journal* 66, 1930-1946
<https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1930>

Annexe 1

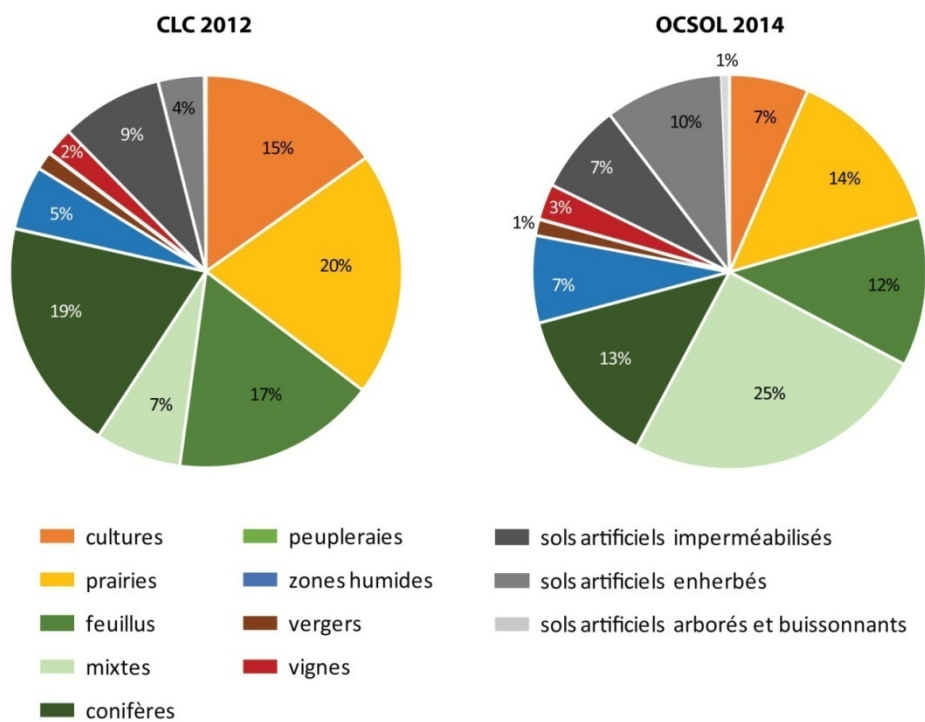
Tableau de correspondances entre les typologies d'occupation des sols de CLC 2012, OCSOL 2014 (CRIGE-PACA) et ALDO (carbone sols et biomasse) :

Typologie Corine Land Cover 2012	Typologie OCSOL 2014	Typologie ALDO (C sols)	Typologie ALDO (C biomasse)
Tissu urbain continu	Tissu urbain continu	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Tissu urbain discontinu	Tissu urbain discontinu + bâtis diffus et autres bâtis	Sols artificialisés	Sols artificialisés
Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	Zones d'activités et d'équipements	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Zones portuaires	Zones portuaires	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Aéroports	Aéroports	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Extraction de matériaux	Extraction de matériaux	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Décharges	Décharges	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Chantiers	Chantiers	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Espaces verts urbains	Espaces ouverts urbains	Sols arborés	Sols arborés
Equipements sportifs et de loisirs	Equipements sportifs et de loisirs	Sols imperméabilisés	Sols imperméabilisés
Terres arables hors périmètres d'irrigation	Terres arables autres que serres et rizières	Cultures	Cultures
Périmètres irrigués en permanence	Cultures irrigués en permanence ou périodiquement	Cultures	Cultures
Rizières	Rizières	Cultures	Cultures
Vignobles	Vignobles	Vignes	Vignes
Vergers et petits fruits	Arboriculture autres qu'oliviers	Vergers	Vergers
Oliveraies	Oliveraies	Vergers	Vergers
Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	Prairies	Prairies	Prairies herbacées
Cultures annuelles associées à des cultures permanentes	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	Cultures	Cultures
Systèmes culturaux et parcellaires complexes	Systèmes culturaux mixtes et petits parcellaires complexes	Cultures	Cultures
Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	Friches agricoles et délaissés en milieu agricole	Cultures	Cultures
Territoires agroforestiers	Espaces agroforestiers	Cultures	Cultures
Forêts de feuillus	Forêts de feuillus	Forêts	Feuillus
Forêts de conifères	Forêts de conifères	Forêts	Conifères
Forêts mélangées	Forêts mélangées	Forêts	Mixte
Pelouses et pâturages naturels	Pelouses et pâturages naturels et semi-naturels	Prairies	Prairies herbacées
Landes et broussailles	Landes et broussailles	Prairies	Prairies arbustive
Végétation sclérophylle	Maquis et garrigues	Prairies	Prairies arborée

Forêt et végétation arbustive en mutation	Forêt et végétation arbustive en mutation	Forêts	Feuillus
Marais intérieurs	Marais intérieurs et roselières	Zones humides	Zones humides
Tourbières	Tourbières	Zones humides	Zones humides
Marais maritimes	Marais maritimes	Zones humides	Zones humides
Marais salants	Marais salants	Zones humides	Zones humides
Zones intertidales	-	Zones humides	Zones humides
Cours et voies d'eau	Cours et voies d'eau	Zones humides	Zones humides
Plans d'eau	Plans d'eau	Zones humides	Zones humides
Lagunes littorales	Lagunes littorales	Zones humides	Zones humides
Estuaires	-	Zones humides	Zones humides
Mers et océans	Mers et océans	Zones humides	Zones humides

Annexe 2

Répartition en pourcentage des stocks de carbone dans le sol et la litière par occupation du sol de l'EPCI (comparaison basée sur Corine Land Cover 2012 et OCSOL 2014) :



Annexe 3

Flux de carbone estimés à partir de l'évolution entre CLC 2006 et CLC 2012

Les flux sont exprimés en milliers de $\text{teq CO}_2/\text{an}$ par occupation du sol et ont été calculés par rapport aux changements d'occupation des sols observés entre CLC 2006 et CLC 2012, mais aussi à partir des variations de l'inventaire forestier 2012-2016 (Figure 20). Il est donc important d'utiliser ces valeurs comme des éléments de comparaison entre les différents types d'occupation des sols plus que comme des valeurs absolues. Les valeurs positives correspondent à un flux de carbone vers l'atmosphère, soit un déstockage, alors que les valeurs négatives correspondent à un stockage de carbone. Parmi les types d'occupation des sols pris en compte par l'outil ALDO, seuls les sols imperméabilisés, les produits bois et la forêt présentent une dynamique de stockage/déstockage remarquable. La transformation d'environ 3000 ha du territoire de la MAMP en sols imperméabilisés entre 2006 et 2012 (11 % de prairies arborées, 30 % de prairies herbacées, 56 % de cultures) a entraîné un déstockage d'environ 27 200 $\text{teq CO}_2/\text{an}$. À l'inverse, la conversion de 90 ha de sols imperméabilisés en forêt a permis de stocker 337 500 $\text{teq CO}_2/\text{an}$ supplémentaires. Quant aux produits bois, ils ont stocké 45 090 $\text{teq CO}_2/\text{an}$.

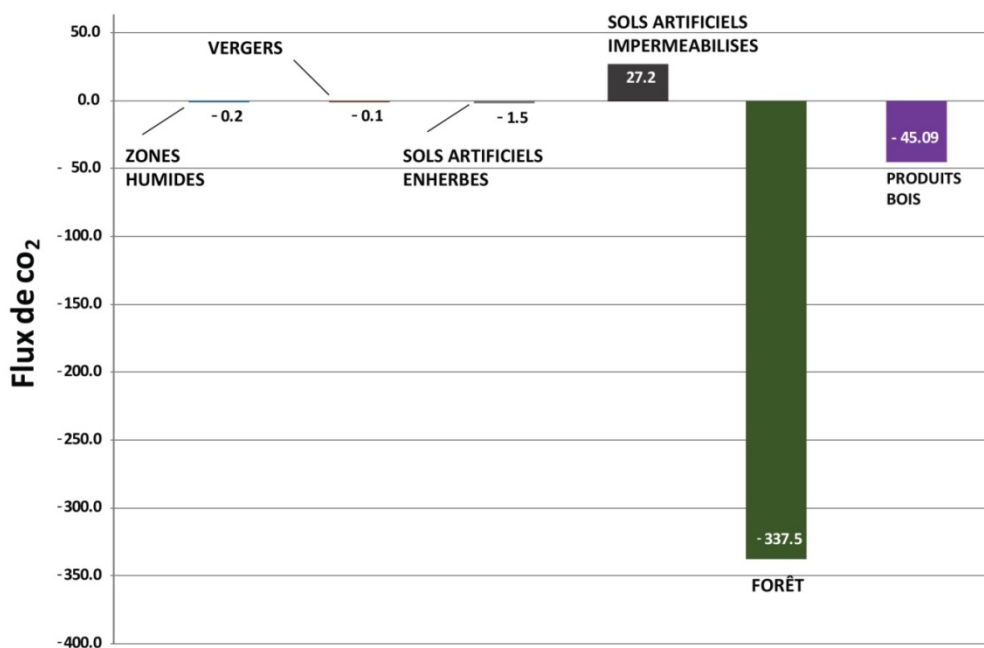


Figure 20. Flux de carbone actuels dans les sols (en milliers de $\text{teq CO}_2/\text{an}$) et la biomasse à l'échelle de la MAMP. Les résultats sont issus de l'outil ALDO basé sur les changements d'occupation des sols entre Corine Land Cover 2006 et 2012

Annexe 4

Changements d'affectation des sols en surface et entre occupation du sol par scénario :

- scénario 1. Changements d'occupation des sols (en ha) entre 2017 et 2040

Occupation du sol initiale (2017)	Occupation du sol finale (2040)						
		Forêt	Prairie	Cultures	Sols artificiels imperméabilisés	Sols artificiels enherbés	Sols artificiels arborés et buissonnants
	Forêt	-	-	-	~ 10 000	-	~ 300
	Prairie	-	-	-	~ 9 000	-	-
	Cultures	-	-	-	-	~ 10 000	-
	Sols artificiels imperméabilisés	-	-	-	-	-	-
	Sols artificiels enherbés	-	-	-	-	-	-
	Sols artificiels enherbés et buissonnants	-	-	-	-	-	-

- scénario 2. Changements d'occupation des sols en ha entre 2017 et 2040

Occupation du sol initiale (2017)	Occupation du sol finale (2040)						
		Forêt	Prairie	Cultures	Sols artificiels imperméabilisés	Sols artificiels enherbés	Sols artificiels arborés et buissonnants
	Forêt	-	-	-	-	-	-
	Prairie	-	-	-	-	-	-
	Cultures	-	-	-	~ 1 000	~ 1 800	~ 500
	Sols artificiels imperméabilisés	-	-	-	-	-	-
	Sols artificiels enherbés	-	-	-	-	-	-
	Sols artificiels enherbés et buissonnants	-	-	-	-	-	-

- scénario 3. Changements d'occupation des sols en ha entre 2017 et 2040

Occupation du sol initiale (2017)	Occupation du sol finale (2040)						
		Forêt	Prairie	Cultures	Sols artificiels imperméabilisés	Sols artificiels enherbés	Sols artificiels arborés et buissonnants
	Forêt	-	-	-	-	-	-
	Prairie	-	-	-	-	-	-
	Cultures	-	-	-	-	-	-
	Sols artificiels imperméabilisés	-	~ 9 200	-	-	-	~ 7 800
	Sols artificiels enherbés	~ 10 300	-	-	-	-	-
	Sols artificiels enherbés et buissonnants	-	-	-	-	-	-



L'association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR Climat), qui entend contribuer à la prise de conscience des enjeux du changement climatique, mais aussi aider à la recherche de solutions innovantes, encourage la transition verte en coordonnant notamment le GREC-SUD.

contacts@air-climat.org

www.air-climat.org

www.grec-sud.fr