



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

Plan climat-air-énergie territorial (PCAET)

**Séquestration du dioxyde de carbone dans les sols agricoles
et les forêts de la communauté d'agglomération Ventoux
Comtat Venaissin**



Juillet 2019

Destinataire



Cette étude technique portant sur l'estimation de la séquestration du carbone dans les sols agricoles et les forêts sur le territoire de la communauté d'agglomération Ventoux Comtat Venaissin 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), de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), d'ASTERRE et de GeographR. Elle entre dans le cadre du plan climat-air-énergie territorial (PCAET). 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 en juillet 2019).

Crédit photo de la couverture et de la 4^{ème} de couverture : @GeographR

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 des forêts 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.....	15
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	18
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 communauté d'agglomération	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. Diagnostic territorial.....	29
4.2.1. Évolution démographique de 2001 à 2014.....	29
4.2.2. Données d'occupation des sols et correspondances avec ALDO	31
4.2.3. Mutations de l'occupation des sols de 2001 à 2014	32
4.3. Estimation de la séquestration du carbone sur la période actuelle récente à l'échelle de la CoVe	35
4.3.1. Stocks de carbone de référence estimés par occupation des sols.....	35
4.3.2. Estimation des stocks de carbone dans les sols, la litière et la biomasse	36
4.3.3. Estimation des flux de séquestration entre 2001 et 2014	38
5. La construction des scénarios de développement urbain	39
6. Quelle évolution du stock et de la séquestration du carbone entre aujourd'hui et 2050 selon les scénarios prospectifs ?	48
Conclusion générale et recommandations	53

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 .

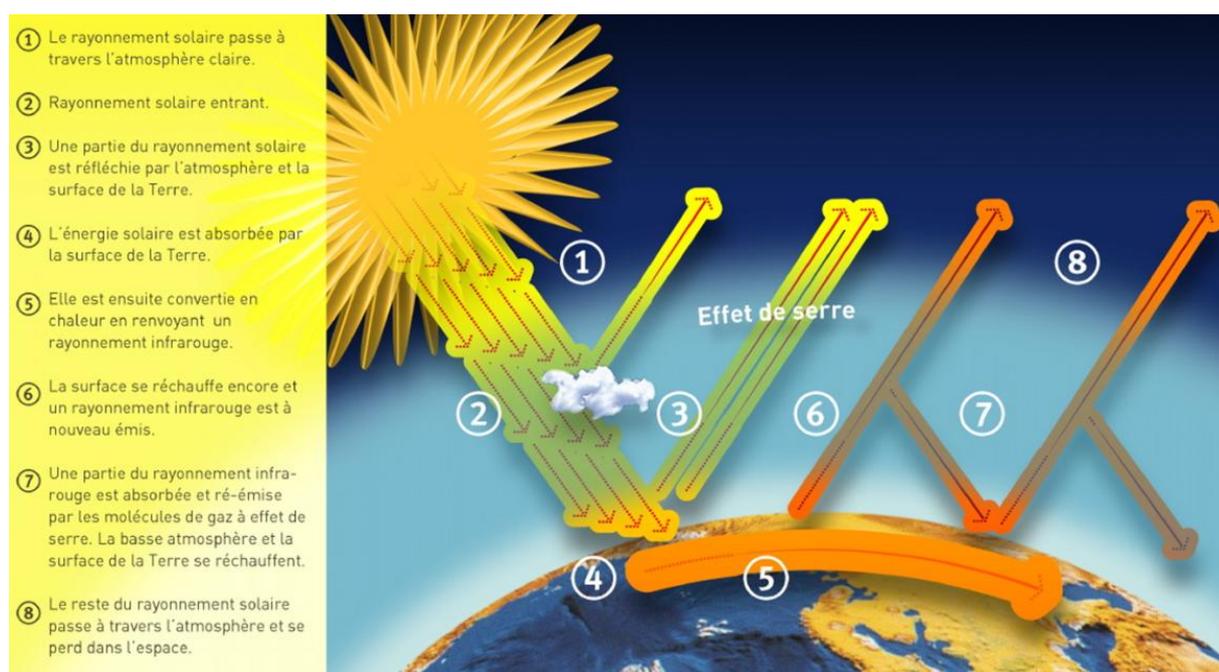


Figure 1. Le principe de l'effet de serre (source : GIEC, 3^{ème} rapport, 2001)

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...).

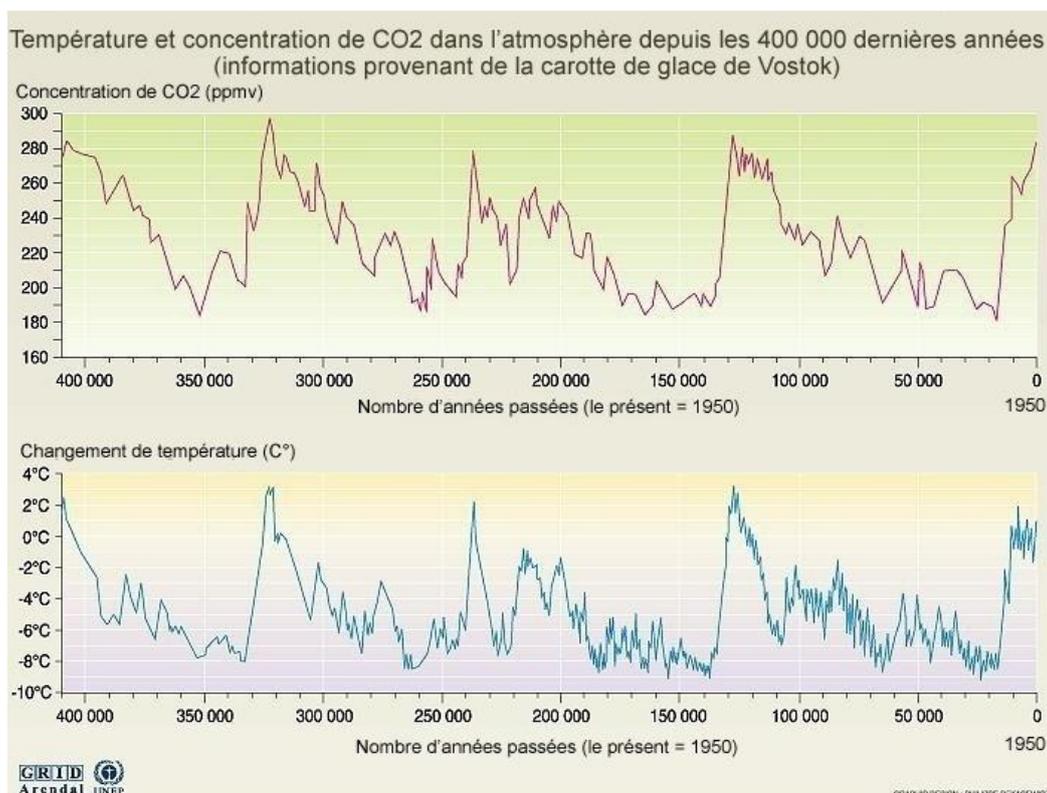


Figure 2. Évolution de la température en fonction des concentrations de dioxyde de carbone ces 400 000 dernières années (source : J.R. Petit, J. Jouzel et al.²)

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 du carbone.

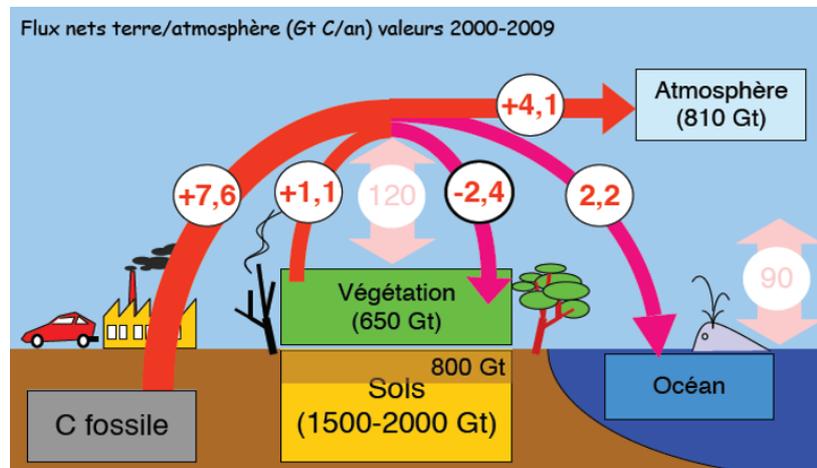


Figure 3. Flux net de séquestration du carbone dans les différentes composantes terrestres (source : données GIEC 2007 & Global Project 2010)

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 communauté d'agglomération Ventoux Comtat Venaissin (CoVe) 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 qui ont tendance à se répéter de manière plus fréquente et à gagner en intensité. À l'échelle de la région et du territoire de la communauté d'agglomération, 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 du 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 communauté d'agglomération Ventoux Comtat Venaissin (CoVe) construit son plan climat-air-énergie territorial. La séquestration du carbone dans les sols agricoles et les forêts fait partie du volet « atténuation ». En effet, le stockage du carbone est principalement assuré, hors séquestration du carbone dans les mers et les océans, 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 les modes d'occupation du sol (MOS), la surface agricole au sein du périmètre de la CoVe est en net recul (actuellement, 39 % d'espaces agricoles couvrent le territoire de la CoVe) : -498 ha/an entre 2001 et 2010, -662 ha entre 2001 et 2014, -164 ha entre 2010 et 2014. Si ce scénario tendanciel se poursuit en l'absence de politique limitative, ce recul, principalement provoqué par l'augmentation des surfaces imperméabilisées (notamment habitat pavillonnaire : sols artificiels enherbés/arbustifs), aura un impact significatif sur le potentiel de séquestration du carbone des sols agricoles. La pression foncière sur les terres agricoles est donc forte, même si le rythme annuel du recul des surfaces a légèrement ralenti ces dernières années. D'après l'INSEE, la population de la CoVe augmentera d'environ 10 % entre aujourd'hui et 2050. Pour accueillir ces nouveaux arrivants, les choix en matière d'urbanisme seront déterminants. Le développement des résidences pavillonnaires, par exemple, se traduira par un étalement urbain qui favorisera le grignotage et la perte d'espaces au détriment des terres agricoles et forestières. Ce type d'habitat abrite une faible proportion de la population par rapport aux surfaces utilisées. Le gain démographique peut ainsi se traduire par une perte de terres susceptibles de séquestrer du carbone. 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 (habitat, hébergement de tourisme...), les secteurs périurbains et ruraux, les infrastructures routières, les industries, les déchetteries, les zones commerciales et artisanales, les plates-formes logistiques...

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 les forêts de la CoVe aujourd'hui et demain.



@GeographR

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 CoVe doit prendre en compte les possibilités de séquestration du 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 du 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 du 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 70 000 d'habitants aujourd'hui, le territoire de la communauté d'agglomération 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 »...



@EP

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

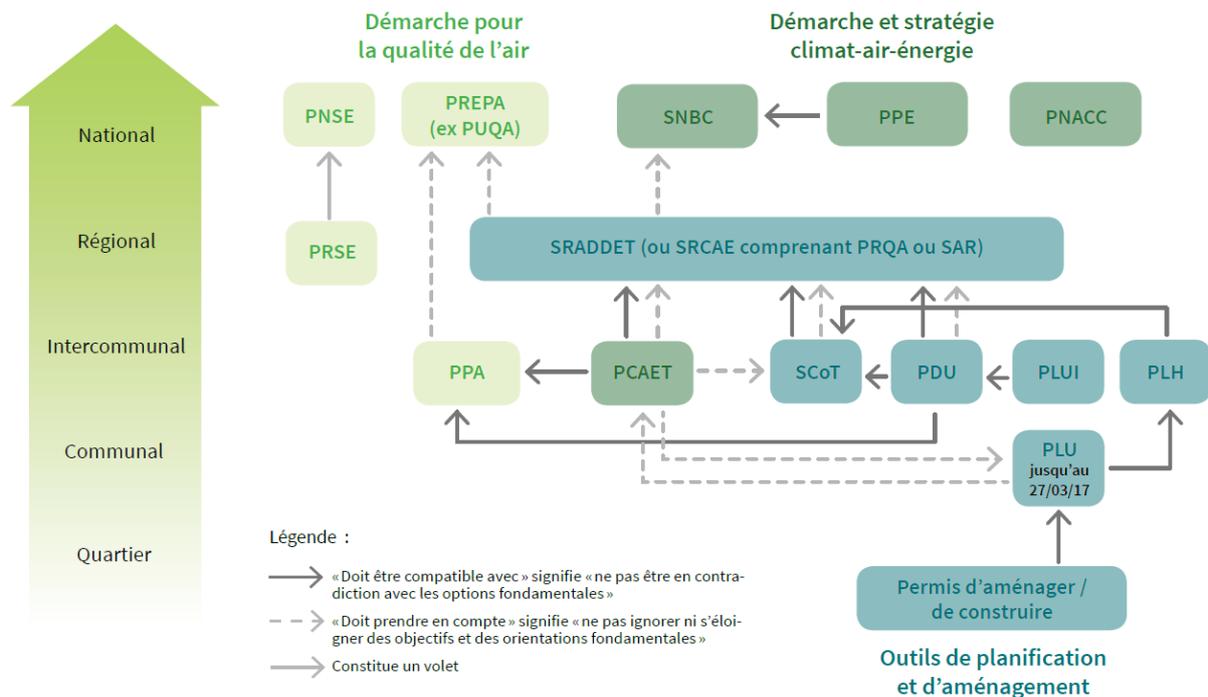


Figure 4. Positionnement du PCAET avec les outils de planification de l'échelle locale à nationale (source : guide « Élus, l'essentiel à connaître sur les PCAET »)

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 des forêts 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 les forêts 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 volontaire 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

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

terme minéralisée » ce qui empêche le stockage définitif. La durée de stockage du carbone organique 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 les forêts 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.

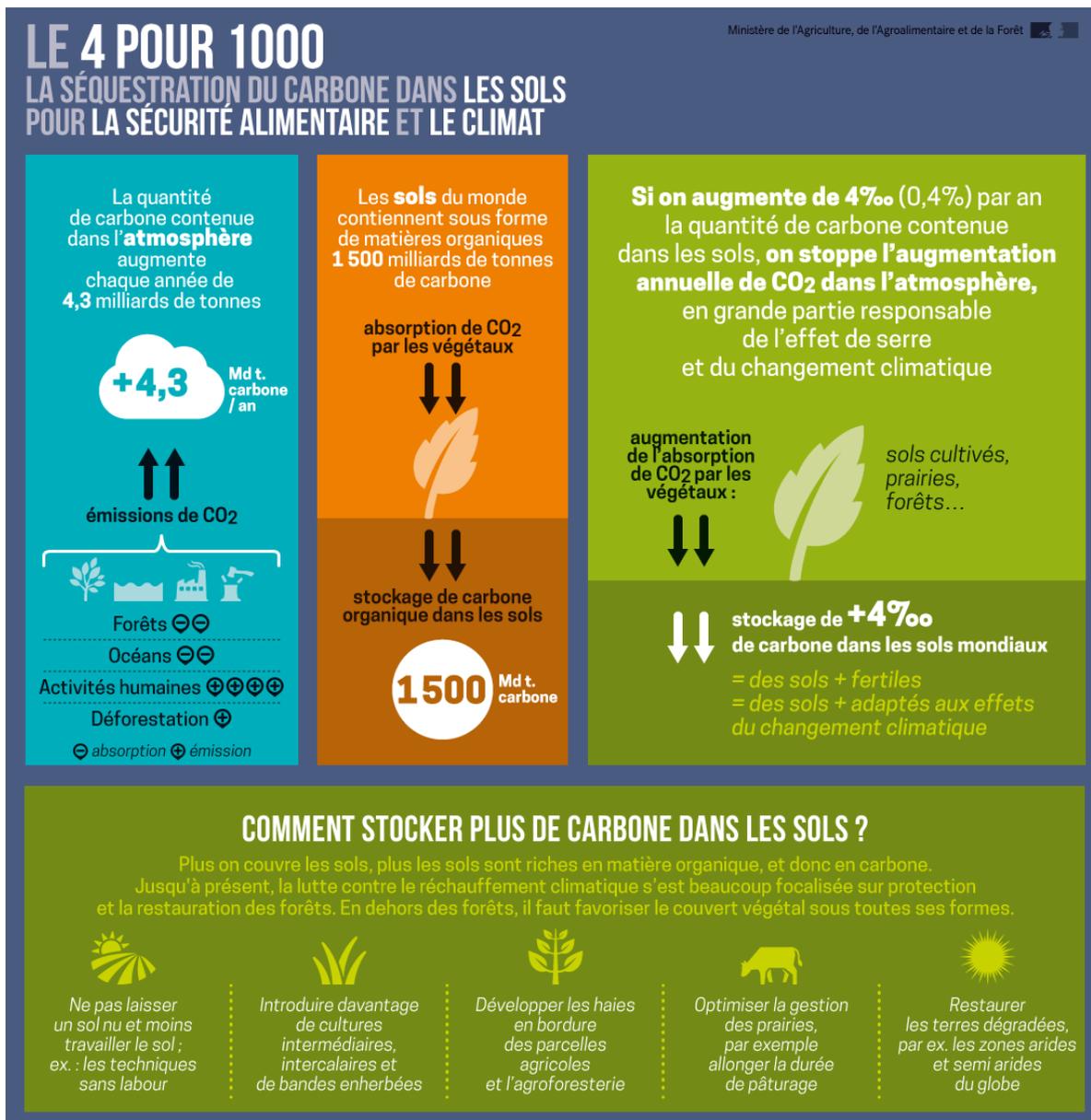


Figure 5. L'initiative 4 pour 1000 lancée lors de la COP 21⁴

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

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

donc un frein majeur, d'autant que celles-ci ne sont pas toujours complètes et fiables, et réalisées 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 du 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 intraparcélaire 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 déstockage de carbone très rapide si aucune précaution n'est prise.

Les sols agricoles et les forêts 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 et 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 du carbone.



@GeographR

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).

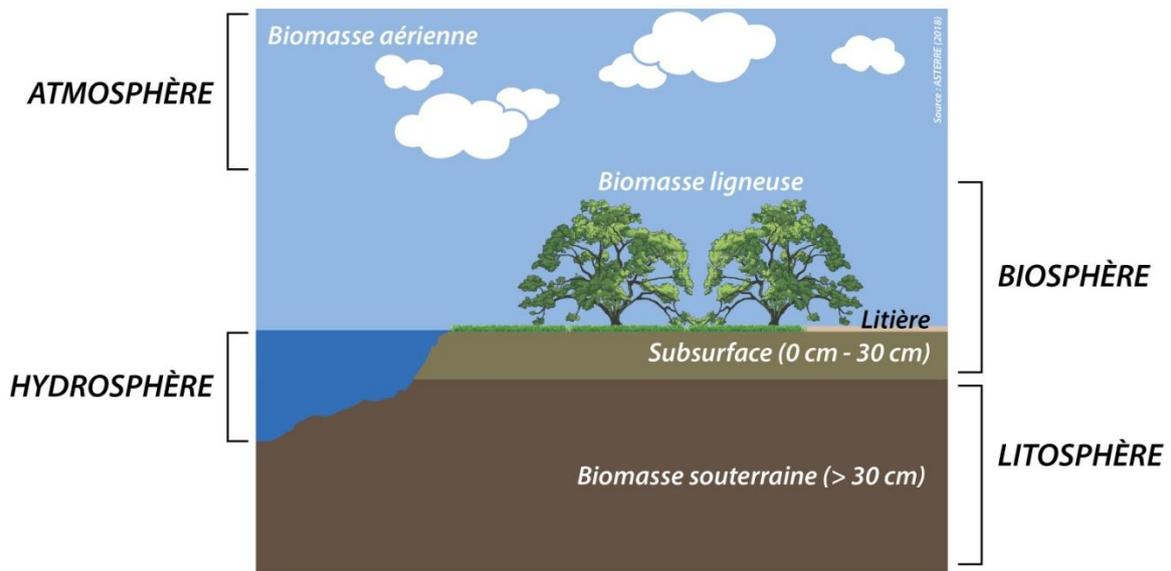


Figure 6. Schéma présentant les principaux réservoirs de carbone (ASTERRE, 2018)

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 CO₂ dans l'atmosphère grâce à la photosynthèse. Elles fixent le carbone du CO₂ 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 CO₂ de l'air. Par le processus de respiration, les végétaux rejettent également du CO₂ dans l'atmosphère.

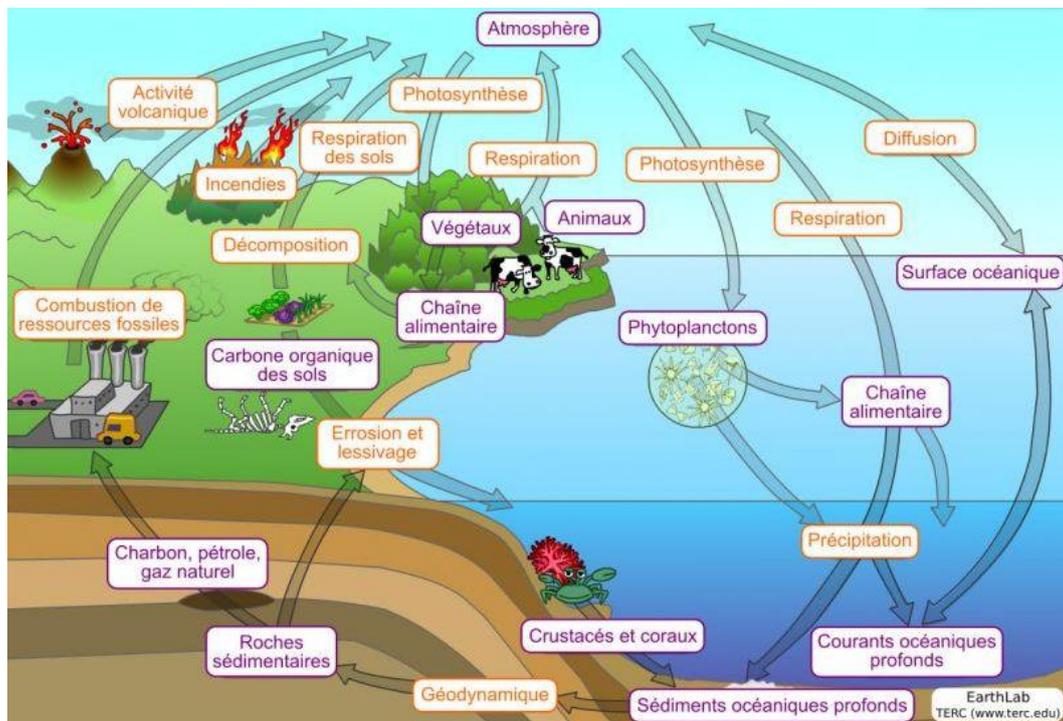


Figure 7. Le cycle du carbone (Earthlab)

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 du 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).

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

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

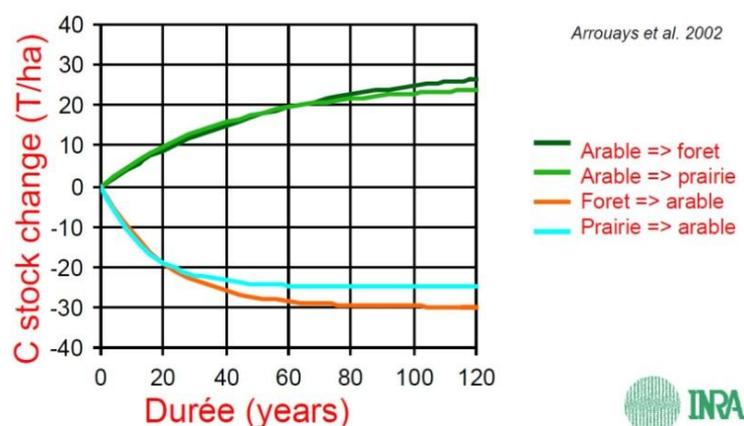


Figure 8. Dynamiques de stockage/déstockage suite à un changement d'affectation du sol. Exemples donnés pour les conversions entre terre arable, forêt et prairie (Arrouays *et al.*, 2002)

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 du 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 du carbone demande du temps. Il est fragile et non extensible : il 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 accrues⁸ ;
- afforester⁹ 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 soumis 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 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.

⁸ En sylviculture, friche agricole qui se couvre naturellement et progressivement d'une forêt

⁹ Concéder le droit d'afforestation (droit de prendre du bois dans une forêt)

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 du 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 du carbone dans le sol à l'aide quelques variables indispensables à sa mesure (Arrouays *et al.*, 2002 ; Chenu *et al.*, 2014) :

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

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 2.0¹⁰ donne accès librement à toutes les équations développées dans l'outil. Des équations 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.

¹⁰ www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-agricole/passer-a-l'action/dossier/evaluation-environnementale-agriculture/loutil-climagri

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 CoVe. Plus la profondeur prise en compte est grande, plus les stocks de carbone sont élevés et moins la dichotomie entre espaces naturels et espaces urbanisés est marquée.

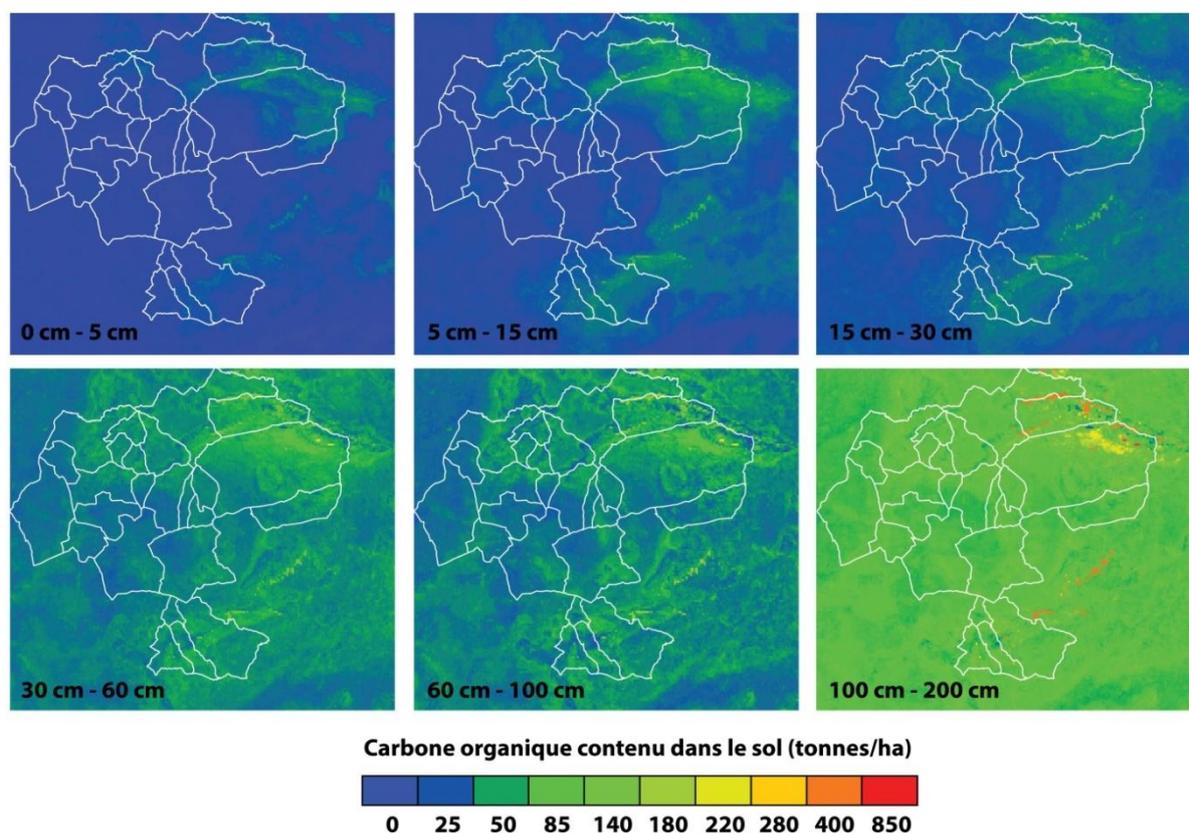


Figure 9. Exemple de cartographie produite par la base de données SoilGrids. Elle représente le stock de carbone organique contenu dans le sol à six profondeurs différentes à une résolution spatiale de 250 m

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

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)

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 disponibles 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 fines d'occupation des sols 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 :

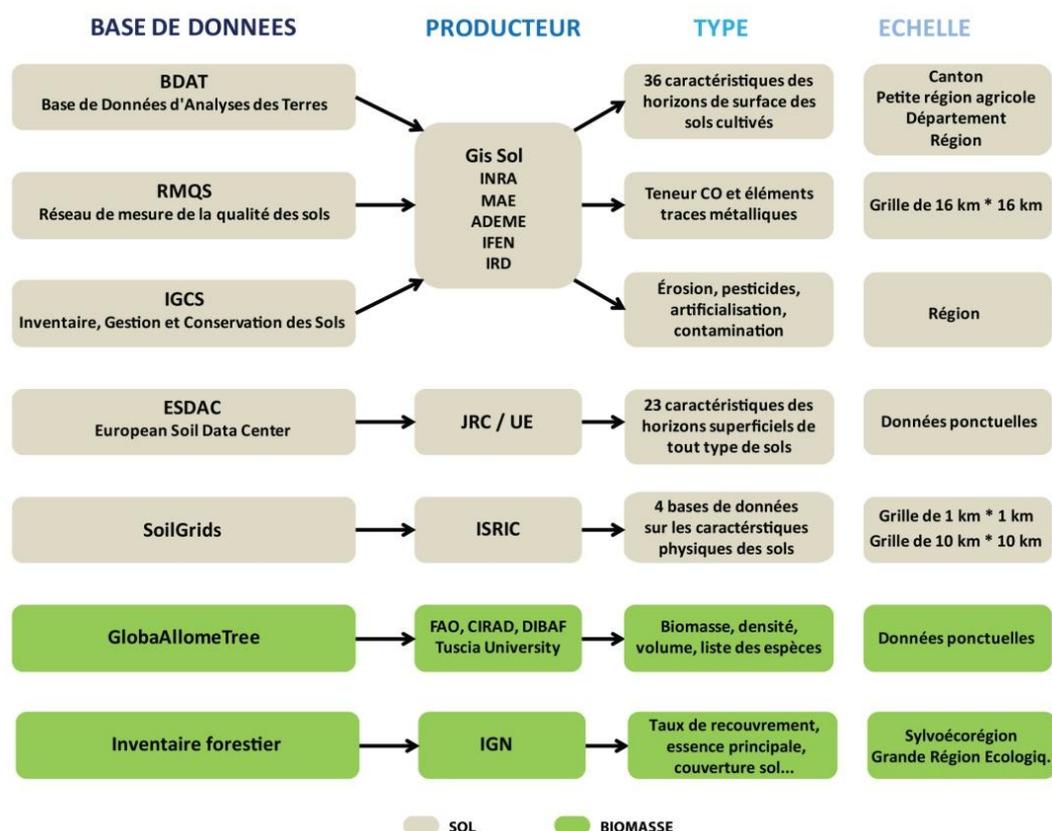


Figure 10. Exemples de bases de données sur les caractéristiques des sols et de la biomasse pour le calcul des stocks et flux de carbone

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 1 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.

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 relatives aux sols et à 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 du 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(s) agricole(s) 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 communauté d'agglomération

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



©GeographR

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, liée 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
résultats_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	-	
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 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 des 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)

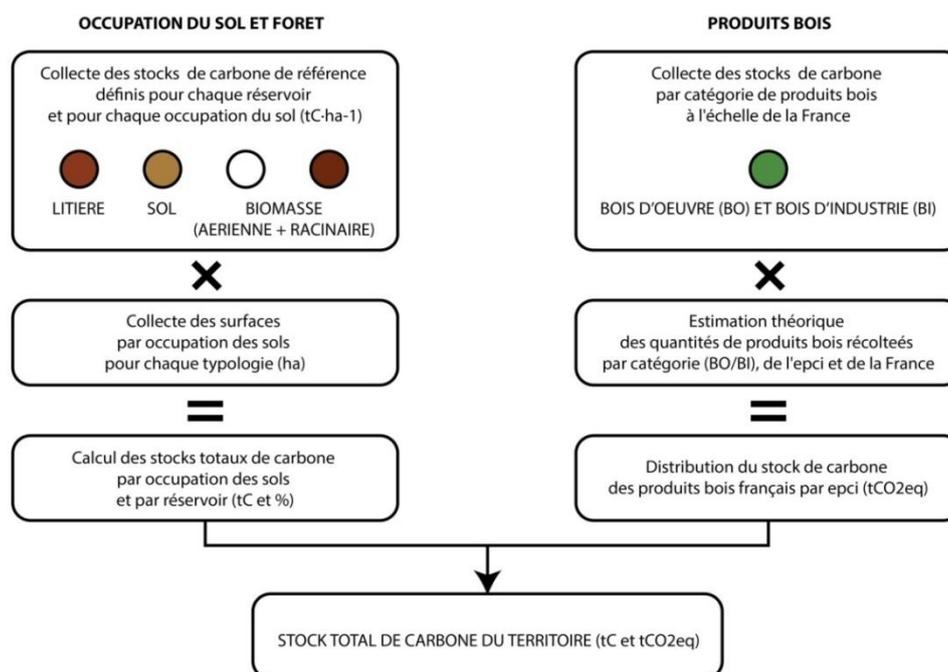


Figure 11. Méthode d'estimation du stock de carbone par occupation du sol à l'échelle de l'EPCI (d'après ADEME, 2018)

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 (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 teq CO₂/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 l'EPCI en prenant en compte les pertes d'exploitation. Celles-ci proviennent de données 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)

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.

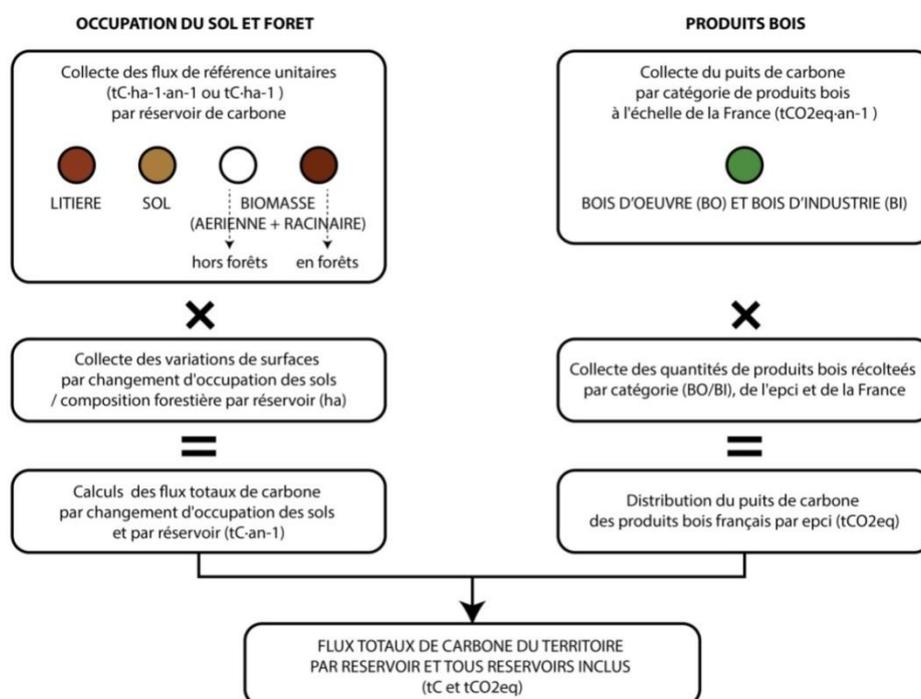


Figure 12. Méthode d'estimation du flux de carbone par occupation du sol à l'échelle de l'EPCI (d'après ADEME, 2018)

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.

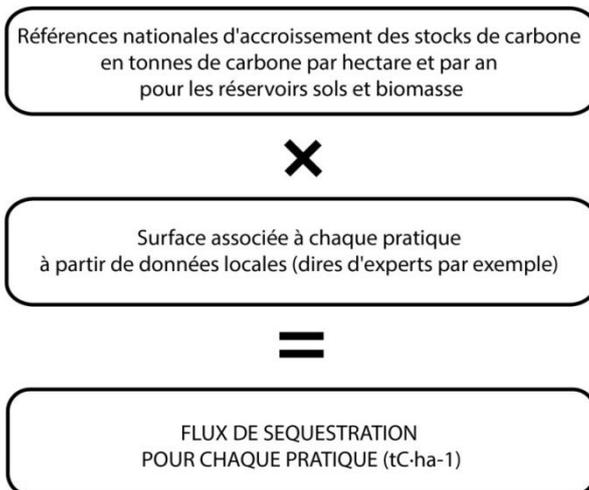


Figure 13. Méthode d'estimation du flux de carbone par occupation du sol à l'échelle de l'EPCI (d'après ADEME, 2018)

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).

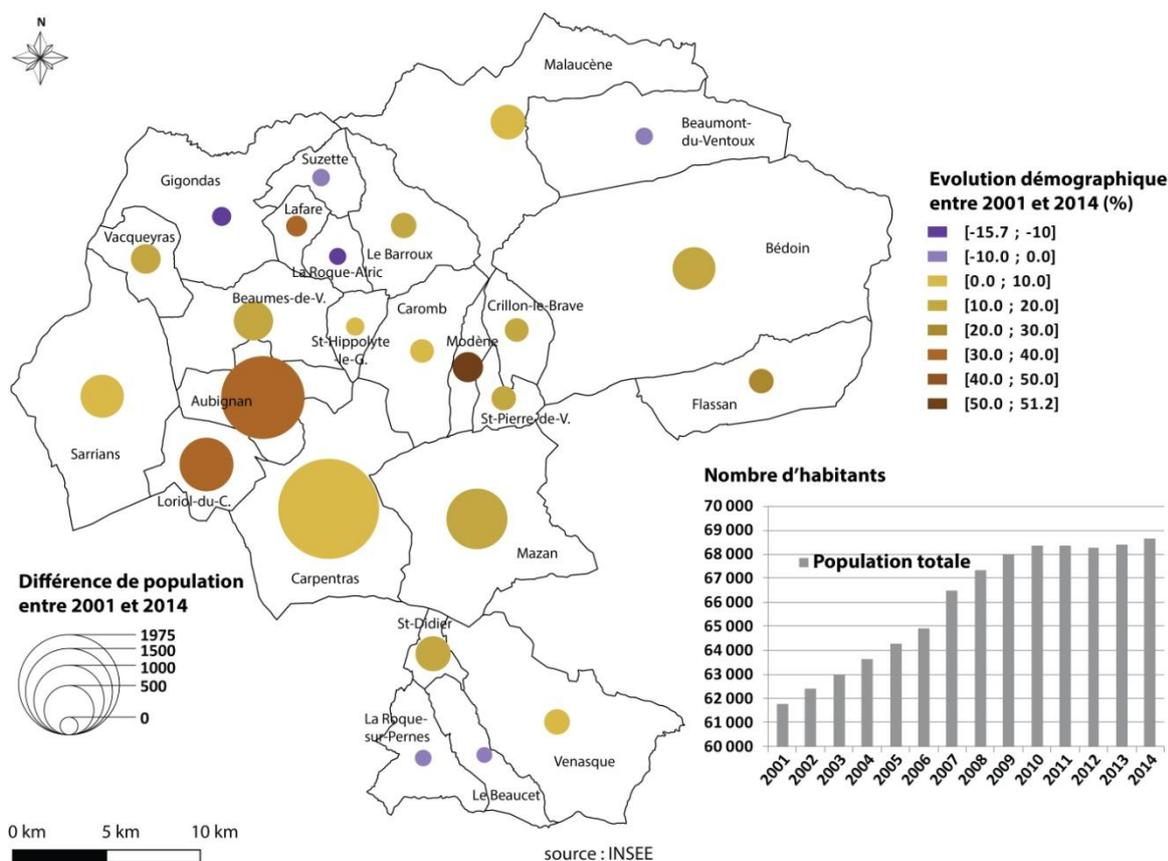
4.2. Diagnostic territorial

Ce diagnostic a pour objectifs : 1/ d'estimer la séquestration du carbone dans les sols et la biomasse à partir d'une analyse de l'occupation des sols à différentes périodes ; 2/ de lier l'évolution démographique aux mutations d'occupation des sols pour comprendre la dynamique territoriale passée et actuelle dans le but de bâtir les scénarios prospectifs à horizon 2050 (chapitre 5 à venir). Il est important de noter que ce diagnostic se base sur les données d'occupation des sols disponibles et sera donc borné de 2001 à 2014. Dans un souci de cohérence, il a été décidé d'utiliser la nomenclature de l'outil ALDO.

4.2.1. Évolution démographique de 2001 à 2014

À l'échelle de la CoVe, la dynamique démographique a été significative entre 2001 et 2010 (+ 10,6 %) avant de se stabiliser jusqu'en 2014 malgré une très légère baisse en 2012 (Figure 14). Cette dynamique ne répond pas à une loi rang-taille classique puisqu'il n'y a pas de relations linéaires entre la surface communale, la population totale et l'évolution démographique. En revanche, il est assez classique d'observer que les communes présentant la plus forte évolution sont les moins peuplées. À titre d'exemple, les communes de La Roque-Alric (51 habitants en 2014) et de Gigondas (534 habitants en 2014) présentent des taux d'évolution démographique négatifs de -12 % et -16 %, et les communes de Lafare (131 habitants en 2014) et Modène (454 habitants en 2014) présentent des taux d'évolution démographique positifs de +33,5 % et +51,2 %. La moitié des communes (12 sur 25) présente une croissance démographique comprise entre +7 % et +17 % tandis que les communes de La Roque-sur-Pernes, Suzette, Beaumont-du-Ventoux, Caromb et Saint-Hippolyte-le-Graveyron ont une dynamique relativement stable comprise entre -3 % et +3 %.

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



Réalisation : Bureau d'études Florian Maller / ASTERRE, 2019

Figure 14. Évolution démographique à l'échelle de la CoVe entre 2001 et 2014 (source : Insee RP et Omphale, scénario central / traitement : service CCT de la CoVe, 2019)

En 2014, la CoVe comptait 68 641 habitants et une grande disparité dans la distribution spatiale des de la population à l'échelle communale. Carpentras, la principale commune, comptait 28 447 habitants en 2014, soit plus de 41 % de la population totale de la CoVe (Figure 15), tandis que les autres communes pouvaient se décliner en trois classes distinctes basées sur le nombre d'habitants :

- entre 5000 et 6000 habitants : Sarrians, Mazan et Aubignan ;
- entre 1100 et 3200 habitants : Caromb, Bédoin, Malaucène, Loriol-du-Comtat, Beaumes-de-Venise, Saint-Didier, Vacqueyras et Venasque ;
- entre 51 habitants (La Roque-Alric) et 668 habitants (Le Barroux), 13 communes (la moitié du nombre de communes de la CoVe).

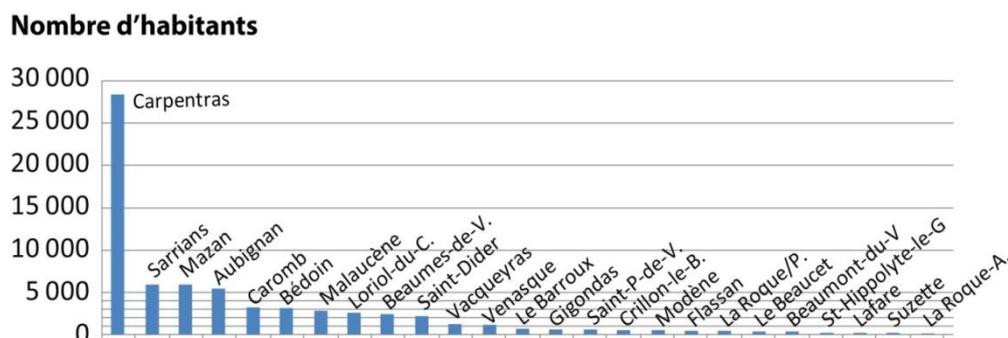


Figure 15. Population par commune en 2014 (sources : Insee RP et Omphale, scénario central / traitement : Service CCT de la CoVe, 2019)

4.2.2. Données d'occupation des sols et correspondances avec ALDO

Les mutations de l'occupation des sols sont suivies depuis 2001 par un MOS (Mode d'occupation des sols), une cartographie obtenue à partir d'une orthophoto aérienne à haute résolution spatiale (Tableau 3). Le MOS de 2001 a été mis à jour en 2010 et en 2014. La nomenclature utilisée est celle développée par le CRIGE PACA appliquée à sa base de données OCSOL. Le niveau de détail retenu pour l'étude est le niveau 3 car il permet d'établir des correspondances avec la nomenclature de l'outil ALDO qui est différente de celles des MOS (Annexe 1).

	2001	2010	2014	2014
Type de base de données	MOS	MOS	MOS	OCSOL PACA
Niveau de la nomenclature	3	5	3 (simplifiée ¹⁷)	3
Producteur	Alisé Géomatique	Alisé Géomatique	Alisé Géomatique	CRIGE PACA
Image source utilisée	Orthophoto IGN 2001	Orthophoto CRIGE-PACA 2010	Pléiade GEOSUD 2014	SPOT 6 2014
Résolution spatiale de l'image source	50 cm	20 cm	50 cm	6 m

Tableau 3. Sources et données à partir desquelles ont été produites les cartographies d'occupation des sols à l'échelle de la CoVe

Les connaissances concernant l'évolution du territoire sont ainsi riches, mais inégales selon les années, puisque le niveau de détail des nomenclatures varie entre les différentes versions du MOS (Tableau 3). En conséquence, certains choix méthodologiques, détaillés ci-dessous, ont été réalisés en amont des analyses :

- **vignobles et vergers** : le MOS 2014 ne disposant pas du même niveau de détail que les MOS 2001 et 2010, il a été décidé de le compléter par l'OCSOL PACA 2014. Ainsi, les surfaces de vignobles et de vergers en 2014 proviennent de la base OCSOL 2014. Ces deux classes étaient considérées comme « cultures permanentes » dans le MOS 2014 ce qui ne permettait pas de les distinguer, ni quantitativement, ni spatialement. Or, la vigne étant une culture majeure à l'échelle de la CoVe, il était indispensable de le prendre en compte quantitativement et spatialement, même si la résolution spatiale de l'image SPOT 6 ayant permis de réaliser l'OCSOL PACA 2014 soit inférieure à l'image Pléiade de 2014 ;
- **forêts et prairies** : les MOS 2001 et 2014 ne détaillant pas les différents types de forêt et de prairie, il a été décidé de se baser sur les proportions du MOS de 2010. Les forêts de feuillus représentent ainsi 25 % des forêts, les forêts de conifères 40 % et les forêts mixtes 35 %. Concernant les prairies, les prairies arbustives représentent 90 % des surfaces, les prairies herbacées et les prairies arborées 5 % chacune ;
- **sols imperméabilisés enherbés/arbustifs** : en raison d'un manque de détail des MOS 2001 et 2014 par rapport au MOS 2010, il n'était pas possible d'identifier les sols artificiels arborés et buissonnants. Pour y remédier, les sols artificiels enherbés/arbustifs ont été regroupés. Ce choix est également justifié par leur faible proportion dans les territoires imperméabilisés (< 5 % en 2010). Afin de prendre en compte l'aspect « végétal » des milieux urbanisés lié à la présence de sols enherbés et/ou buissonnants, la proportion végétation/zone imperméabilisée a été définie selon ce rapport : 30/70 %.

¹⁷ Dans le MOS 2014, les « vignobles » et « vergers » sont regroupés dans la classe « cultures permanentes »

4.2.3. Mutations de l'occupation des sols de 2001 à 2014

Les mutations du territoire de la CoVe ayant accompagné l'évolution démographique entre 2001 et 2014, trois types de territoire sont présentés ici : artificiel, agricole et naturel. Il est important de noter que les analyses cartographiques effectuées dépendent fortement de la qualité de la donnée d'entrée (digitalisation des parcelles, précision topologique, etc.).

Les surfaces des divers types d'occupation des sols ont relativement peu évolué à l'échelle du territoire de la CoVe. L'urbanisation a cependant progressé et modifié la physionomie des communes. Les territoires artificialisés sont composés des « sols artificiels imperméabilisés » et des « sols artificiels enherbés/arbustifs ». Hormis le tissu urbain qui présente une faible surface stable dans le temps, toutes les classes des sols artificiels imperméabilisés ont largement augmenté (Tableau 4). Il faut notamment noter la hausse de 52,6 % des espaces « réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés » (expliquée partiellement par le contournement de Carpentras), mais également la très forte augmentation (65,3 %) des surfaces associées aux « activités extractives ». Ces surfaces possèdent un stock de carbone limité qui ne pourra pas croître en l'absence de végétation et d'un sol développé. Quant aux sols artificiels enherbés/arbustifs, ils correspondent principalement aux espaces résidentiels dédiés au logement des populations, mais aussi aux espaces ouverts urbains et aux équipements sportifs et de loisirs. Ce sont donc des espaces présentant des sols et de la biomasse susceptibles de stocker du carbone. Deux évolutions sont notables : le tissu urbain discontinu, correspondant surtout à l'habitat périurbain, en hausse de 19 %, et les espaces ouverts urbains en baisse de 17,5 %, mais qui représentent une faible surface (189,7 ha en 2014).

		Surface (ha)		Évolution (%)
		2001	2014	
Sols artificiels imperméabilisés	Tissu urbain continu	84,6	84,5	-0,1
	Zones industrielles et commerciales	424,5	509,7	20,1
	Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés	895,1	1365,6	52,6
	Activités extractives	191,4	316,3	65,3
Sols artificiels enherbés/arbustifs	Tissu urbain discontinu	1967,5	2341,8	19,0
	Bâti diffus	1601,9	1724,0	7,6
	Espaces ouverts urbains	229,9	189,7	-17,5
	Équipements sportifs et de loisirs	170,2	195,4	14,8

Tableau 4. Évolutions des surfaces urbanisées entre 2001 et 2014 à l'échelle de la CoVe

Il en résulte une progression de 10,4 % de la tache urbaine entre 2001 et 2014, en particulier au niveau des communes situées en plaine, moins contraintes par les espaces naturels et le relief (Figure 16). Parmi ces communes situées sur la partie ouest du territoire se trouvent notamment Carpentras, Mazan, Aubignan ou encore Loriol-du-Comtat. Cette urbanisation peut s'expliquer par le développement des réseaux de transport et la proximité des bassins d'emploi de Carpentras et d'Avignon. À l'inverse, la commune de la Roque-sur-Perne présente une baisse de surfaces urbanisées en raison d'une zone d'une surface de 24,2 ha classée « Territoire artificialisé » en 2001,

puis classée « Forêts et milieux naturels » en 2014. La Roque-Alric quant à elle présente une zone de 11,3 ha classée « Territoire artificialisé » en 2001, puis classée « Territoire agricole » en 2014.

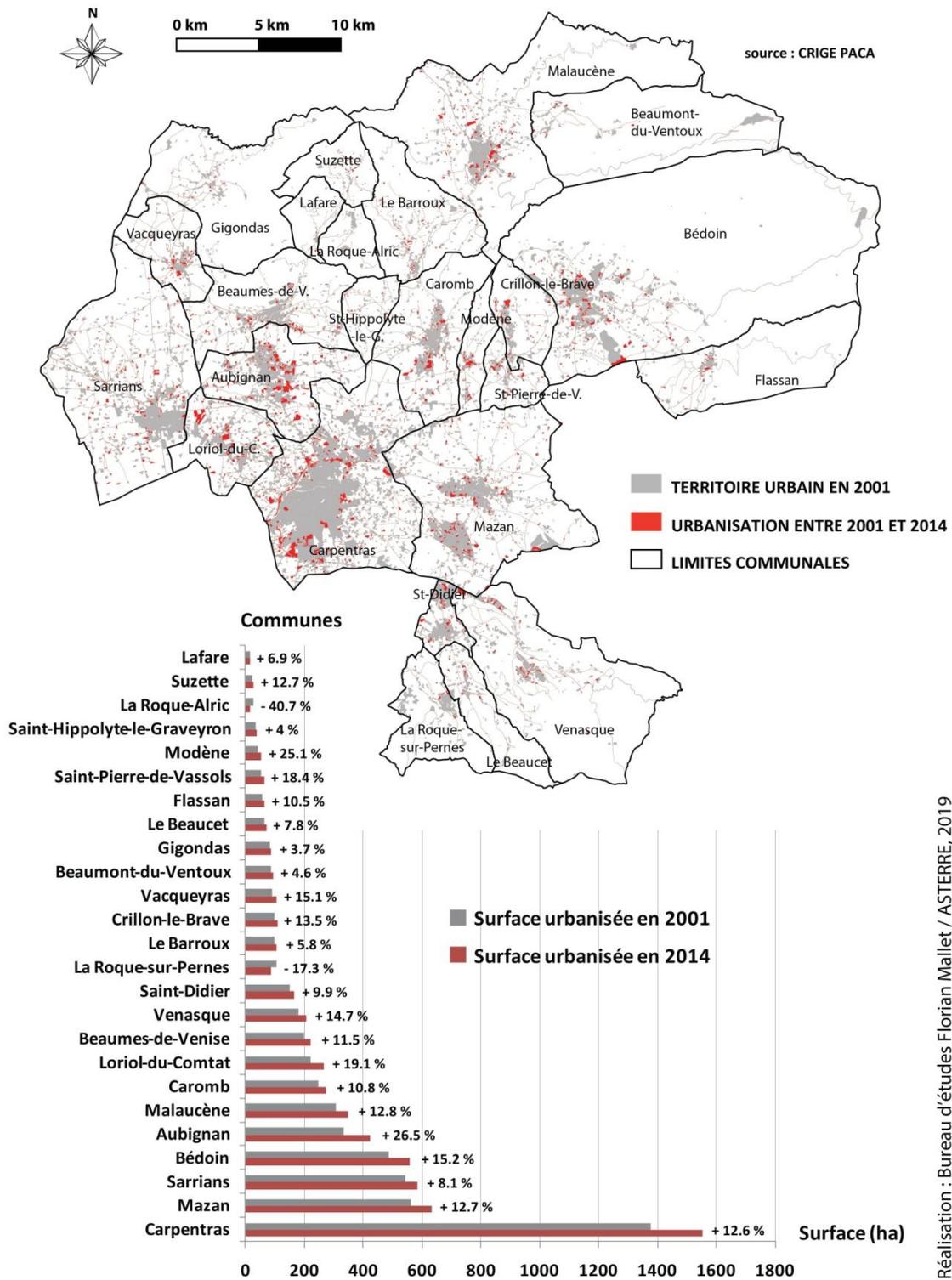


Figure 16. Évolution de l'urbanisation entre 2001 et 2014 à l'échelle de la CoVe (source : CRIGE PACA, SMAEMV)

Les mutations urbaines observées entre 2001 et 2014 concernent environ un tiers des zones artificielles imperméabilisées et deux tiers des zones artificielles enherbées et/ou arbustives. Globalement, l'urbanisation est diffuse avec la multiplication, en zone périurbaine, des lotissements et des maisons individuelles plus ou moins espacés (bâti discontinu). Ce type d'urbanisation crée en

secteurs agricoles un mitage associé aux propriétés agricoles et aux bâtiments associés. L'analyse des mutations de l'occupation des sols entre 2001 et 2014 montre que les espaces grignotés et menacés par cette trame urbaine « lâche » sont en majorité les espaces agricoles et en plus faible proportion les prairies arbustives (Annexe 2).

Les surfaces agricoles sont divisées en trois catégories (Figure 17) :

1. la classe « cultures » représentée par « les terres arables et prairie » et les « zones agricoles hétérogènes » ;
2. la classe « vergers » représentée par les « oliveraies » et l'« arboriculture autre qu'oliviers » ;
3. les vignobles.

Spatialement, les cultures sont majoritairement situées en plaine et sur la partie ouest du territoire, à l'exception des vignobles principalement plantées sur les piémonts (mont Ventoux, Dentelles de Montmirail). Les vergers, présentant une surface moindre (12 % en 2014), sont repartis de façon plus éparse au sein du territoire. Les terres agricoles sont en recul, passant de 20 861 ha en 2001 à 20 200 ha en 2014. En termes de mutations, les « cultures » sont passées de 31 % des surfaces agricoles en 2001, à 34 % en 2010, puis 32 % en 2014. Les pertes d'espaces agricoles se font essentiellement au profit des sols imperméabilisés, notamment enherbés/arbustifs. Comme énoncé précédemment, ces espaces urbanisés correspondent au bâti agricole et/ou au bâti discontinu en milieu périurbain. Quant aux espaces de cultures « gagnés », ce sont surtout d'anciens vignobles et vergers. La part des vergers a d'ailleurs globalement baissé, passant de 15 % (environ 3000 ha) des espaces agricoles en 2001 à 12 % en 2014 (environ 2600 ha). Les espaces de vergers perdus sont pour l'essentiel devenus des espaces de cultures et des espaces imperméabilisés enherbés/arbustifs. En revanche, la vigne, la culture la plus répandue à l'échelle de la CoVe, a légèrement augmenté et représentait en 2014 plus de 11 000 ha, soit 56 % des surfaces agricoles.

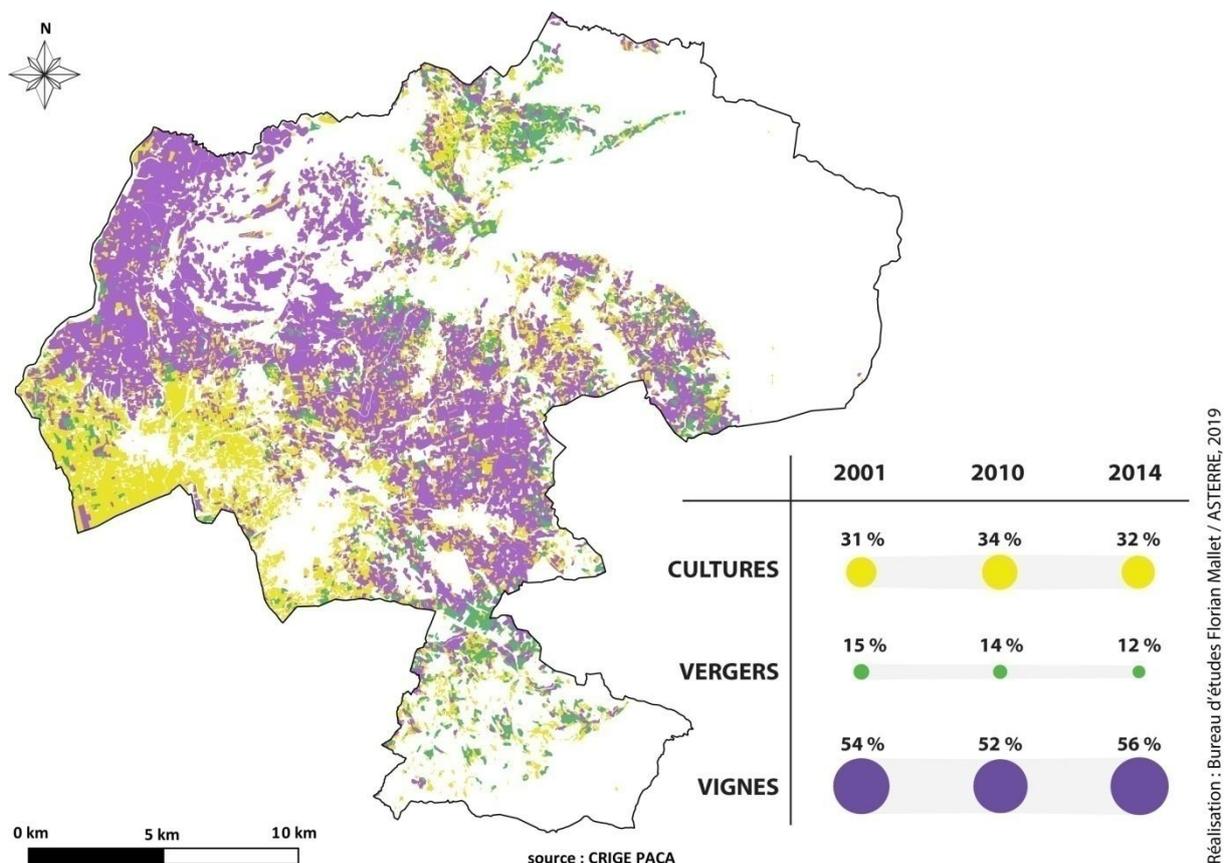


Figure 17. Évolution des espaces agricoles, des vergers et des vignes entre 2001 et 2014 à l'échelle de la CoVe (sources : CRIGE PACA, SMAEMV)

Enfin, la surface couverte par les espaces naturels est relativement stable depuis 2001 et correspond à près de 50 % de la surface totale de la CoVe (proche de 25 000 ha en 2014, Figure 18). Les espaces naturels sont divisés en trois classes :

1. les prairies de types « prairie herbacée », « prairie arbustive » et « prairie arborée » ;
2. les forêts de types « forêt de conifère », « forêt de feuillus » et « forêt mixte » ;
3. les « zones humides ».

Les surfaces forestières ont augmenté de presque 10 % entre 2001 et 2014, en raison principalement de la transformation des prairies arbustives en forêt. Ce phénomène est notamment observé au niveau des communes de Gigondas, Suzette et La Roque-Alric. La surface des prairies arbustives (90 % des prairies) a également baissé au détriment des parcelles agricoles bien que le phénomène inverse soit également observé, mais dans une moindre mesure. Enfin, la surface des zones humides est relativement stable.

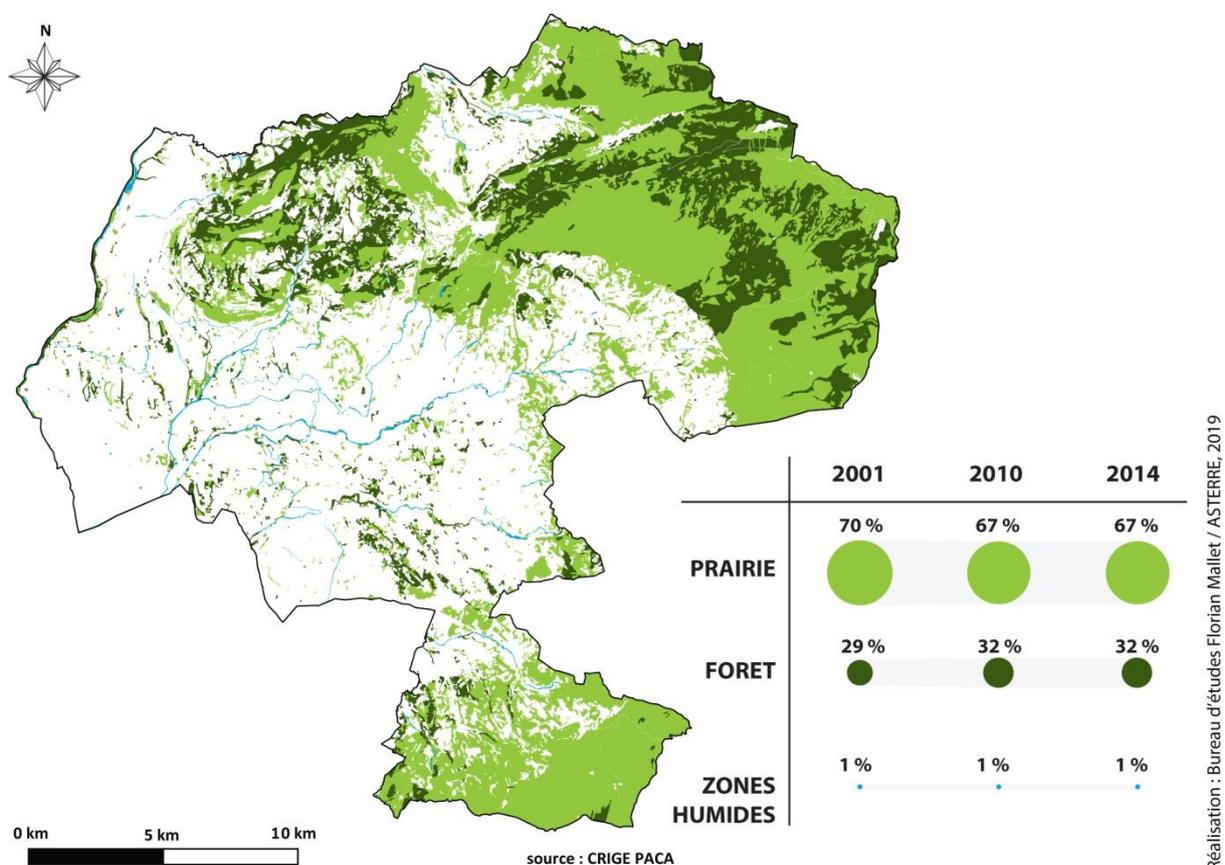


Figure 18. Évolution des espaces naturels entre 2001 et 2014 à l'échelle de la CoVe (sources : CRIGE PACA, SMAEMV)

4.3. Estimation de la séquestration du carbone sur la période actuelle récente à l'échelle de la CoVe

Les données disponibles permettent d'estimer les stocks de carbone selon différentes déclinaisons. Ce diagnostic permettra à terme d'évaluer l'évolution de la séquestration du carbone dans les sols agricoles et les forêts à l'avenir.

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

À l'échelle du territoire de la CoVe, les occupations des sols (Figure 19) 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 arborés et buissonnants (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 par exemple, permet d'augmenter le potentiel de stockage.

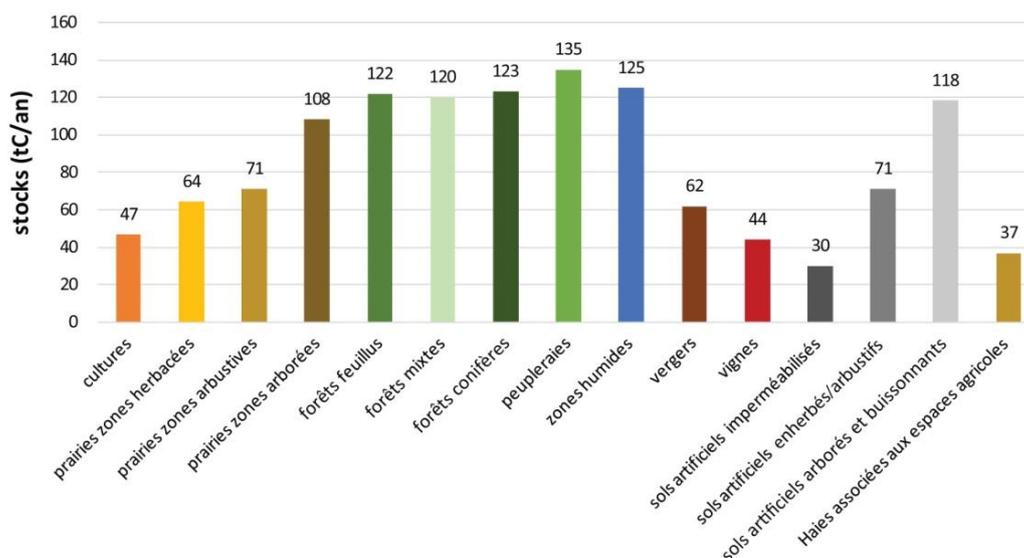


Figure 19. Stocks de référence (tC/ha) par occupation du sol de l'EPCI (tous réservoirs inclus)

4.3.2. Estimation des stocks de carbone dans les sols, la litière et la biomasse

Les stocks de carbone sont obtenus en multipliant la surface de chacune des occupations du sol par la valeur de stockage théorique de chacune des occupations du sol par type de réservoir. Les différences entre les MOS sont assez faibles et correspondent aux variations de surface des occupations du sol. À l'échelle de la CoVe, ce ne sont pas les types d'occupation du sol les plus « stockants » qui présentent les plus grandes proportions de stock de carbone, mais celles qui ont la plus grande surface (Figure 20). À titre d'exemple, la prairie représente 36 % du carbone contenu dans le sol et la litière en 2014, malgré un stock de référence de 64 tC/an. Cette situation s'explique par le fait qu'un tiers du territoire est couvert par des prairies en 2014. Ce constat est similaire pour les cultures qui ont un stock de référence de 47 tC/an et qui représentent pourtant 10 % du carbone contenu dans le sol et la litière. Ce constat est encore plus marquant avec la vigne qui possède la valeur de stock de référence la plus basse (39 tC/an) après les sols artificiels imperméabilisés. Pourtant, avec environ 11 000 ha à l'échelle de la CoVe, la vigne représente 15 % du stock de carbone dans les sols en 2014. Les forêts, avec une valeur de référence de 74 tC/an, représentent au total 20 % du stock de carbone contenu dans le sol et la litière, tandis que les zones humides, par leur faible surface, ne représentent qu'un 1 % du stock et ce malgré la valeur de référence la plus élevée (125 tC/an).

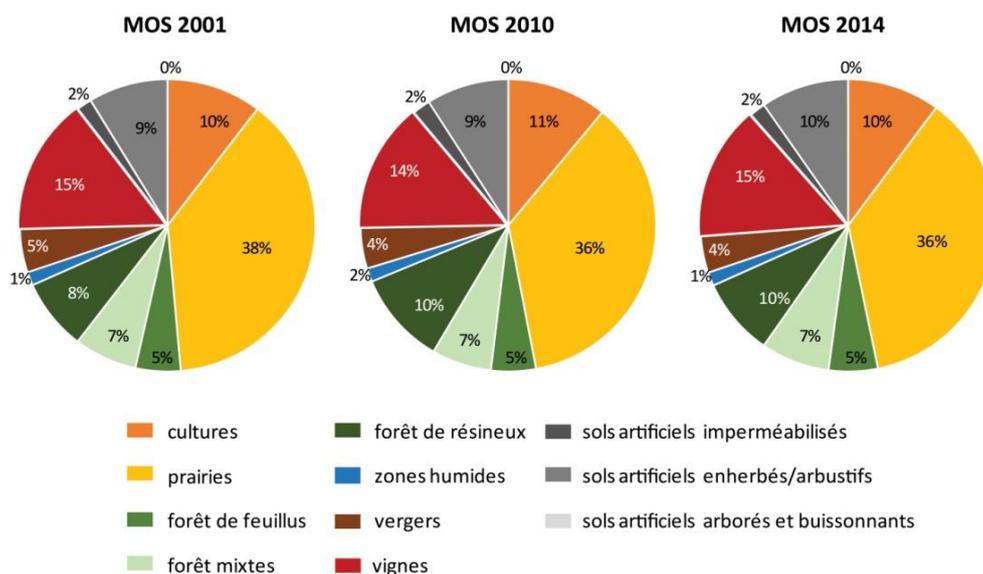


Figure 20. Répartition des stocks de carbone dans les sols et la litière par occupation du sol à l'échelle de la CoVe (source : ALDO)

Le stockage dans la biomasse concerne principalement 8 types d'occupation des sols. La forêt (tous types confondus) représente 54 % du stock de carbone dans la biomasse (Figure 21), avec notamment la forêt de résineux qui, avec un stock de référence de 123 tC/an, représentent 22 % du stock de carbone en 2014 et jusqu'à 26 % en 2010. La prairie arbusculaire est le second type d'occupation du sol qui stocke le plus de carbone dans la biomasse malgré une baisse depuis 2001 (23 % en 2001 contre 21 % en 2014). Le détail de la nomenclature du MOS 2010 a permis de mettre en avant un stock de 5 % par les prairies arborées. Les vergers et les vignes représentent respectivement des stocks de carbone compris entre 8 % et 10 % depuis 2001, ce qui n'est pas négligeable pour des types de culture ayant des stocks de référence faible à moyen (44 tC/an pour les vignes et 62 tC/an pour les vergers). Les sols artificiels imperméabilisés représentent 6 % du stock de carbone dans la biomasse du fait de la présence de 30 % en moyenne de surfaces enherbées et/ou arbustives par hectare. Enfin, les zones agricoles, en raison d'une surface de biomasse aérienne très faible, ne représentent qu'1 % du stock de carbone dans la biomasse.

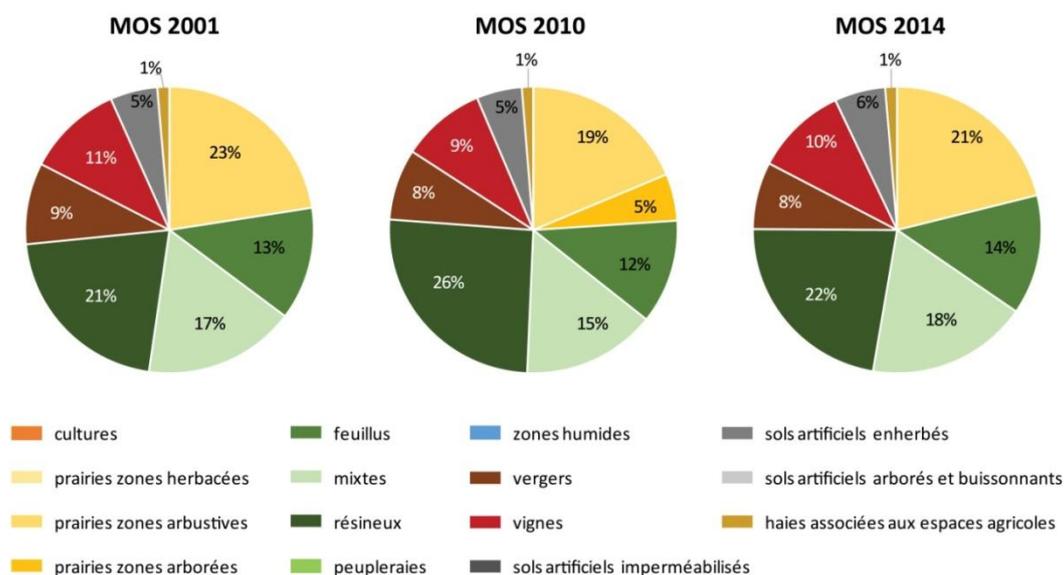


Figure 21. Répartition des stocks de carbone dans la biomasse par occupation du sol à l'échelle de la CoVe (source : ALDO)

Au final, les stocks de carbone (tCO₂eq) ont augmenté de 1,1 % entre 2001 et 2014, soit 146 224 tCO₂eq (Tableau 5). Ce résultat prend en compte des données relatives aux produits bois qui correspondent à des estimations théoriques des récoltes totales en bois d'œuvre (BO) et bois d'industrie (BI) à l'échelle des EPCI (récolte théorique considérant un niveau de prélèvement et une répartition entre usage égal à celui de la région) incluant les pertes d'exploitation.

		Stocks de carbone (tCO ₂ eq)		
		2001	2010	2014
Forêt		3 102 821	3 409 894	3 403 321
Prairies permanentes		4 537 587	4 355 197	4 386 409
Cultures	Cultures annuelles et prairies temporaires	1 114 042	1 169 898	1 096 051
	Cultures pérennes (vergers, vignes)	2 516 961	2 371 549	2 397 135
Sols artificiels	Espaces végétalisés	1 038 545	1 073 268	1 157 333
	Sols imperméabilisés	175 560	209 330	189 200
Autres sols (zones humides)		160 417	160 875	162 708
Produits bois (dont bâtiments)		471 372	471 372	471 372
Haies associées aux espaces agricoles		26 373	26 373	26 373
Stock total (tC)		3 584 640	3 613 024	3 624 519
Stock total (tCO ₂ eq)		13 143 678	13 247 756	13 289 902

Tableau 5. Bilan des stocks de carbone à l'échelle de la CoVe de 2001 à 2014 (source : ALDO)

Ces données ne sont pas disponibles *via* les MOS et pourraient être affinées avec l'aide des organismes locaux (gestionnaire des forêts, ONF par exemple). Le résultat tient également compte des surfaces des haies¹⁸ associées aux espaces agricoles. Le MOS 2010 contenait une donnée de type « linéaire » sur les haies et non une donnée « surfacique ». La précision des résultats ci-dessous peut donc être améliorée en fonction des données locales disponibles en plus des données liées à l'occupation du sol.

4.3.3. Estimation des flux de séquestration entre 2001 et 2014

L'outil ALDO dispose de données sur les flux de carbone (par hectare et par an) entre une occupation du sol initiale et une occupation du sol finale. Il est ainsi possible de connaître le flux (séquestration ou déstockage) associé à la conversion de 100 hectares de forêt en 100 hectares de prairie agricole, ou de 100 hectares de vergers en 100 hectares de vignes. En revanche, en l'absence de changement d'occupation des sols entre deux années sur une même parcelle, ALDO considère qu'il n'y a pas de flux sur cette parcelle entre ces deux années. À titre d'exemple, 100 hectares de vignes en 2010 qui seraient toujours 100 hectares de vignes en 2011 n'impliqueraient ni de stockage, ni de déstockage, car l'occupation du sol est stable. Théoriquement, il existe des flux (séquestration ou déstockage) même sur une parcelle dont l'occupation du sol est constante durant plusieurs années, mais les incertitudes sur le calcul de ces flux (par manque d'observations) sont actuellement trop grandes pour donner un chiffre précis. ALDO estime tout de même des flux de carbone annuels pour les forêts et les produits bois en prenant en compte « un taux de prélèvement théorique égal à celui de la grande région écologique et une répartition entre usage égal à celui de la région administrative ».

¹⁸ Données issues du croisement des données du référentiel parcellaire graphique (RPG) 2012 et de la couche végétation de la BD TOPO de l'IGN par l'Observatoire du développement rural de l'INRA (2018).

De cette manière, on observe une séquestration du carbone en forêt entre deux années à occupation du sol constante.

À l'échelle de la CoVe, les estimations de flux de carbone ont été calculées à partir des changements entre les MOS 2001 et 2014. Les flux sont exprimés en tC et TCO₂eq afin d'être comparés aux stocks (Tableau 6). L'estimation des flux montre d'abord qu'ils sont bien plus faibles que les stocks. Les flux associés au sol et à la litière sont négatifs, ce qui signifie une émission de carbone dans l'atmosphère. Ceci est principalement dû à la progression de la tache urbaine au détriment des espaces agricoles et des prairies, entraînant un recul des surfaces végétalisées, un appauvrissement des sols et donc un déstockage du carbone. À l'inverse, le réservoir biomasse présente des valeurs positives correspondant à une séquestration du carbone dans les parties aériennes des végétaux. Ces valeurs peuvent paraître très faibles, mais il est très difficile de stocker du carbone (processus long), alors qu'il est très facile de le déstocker (processus court). Le flux total positif entre 2001 et 2014 montre donc que, malgré les changements d'occupation du sol ayant donné lieu à du déstockage de carbone, la stabilité de la forêt et la transformation des prairies arbustives en forêt ont permis d'augmenter légèrement le stock de carbone total.

Flux de carbone entre 2001 et 2014	
Flux total de C sol et litière (tC·an ⁻¹)	-3 800
Flux total de CO ₂ sol et litière (tCO ₂ ·an ⁻¹)	-13 933
Flux total de C biomasse (tC·an ⁻¹)	17 521
Flux total de CO ₂ biomasse (tCO ₂ ·an ⁻¹)	64 242
Flux total de C (tC·an ⁻¹)	13 721
Flux total de CO ₂ (tCO ₂ ·an ⁻¹)	50 309

Tableau 6. Bilan des flux de carbone à l'échelle de la CoVe de 2001 à 2014 (source : ALDO). Les valeurs en bleu correspondent à une « séquestration » tandis que les valeurs en rouge correspondent à une « émission ». Le flux total de C biomasse tient également compte des produits bois.

Il faut retenir qu'un grand nombre de pratiques agricoles et forestières sont « stockantes ». Ces dernières doivent impérativement être encouragées. Des expériences *in situ* ont prouvé que les sols agricoles et forestiers ont une capacité à stocker du carbone (Arrouays *et Al.*, 2003), mais la complexité des processus de stockage/déstockage en fonction des types d'occupation du sol, des types de sols, des propriétés des sols (profondeur, granulométrie, texture...) et du climat, ne permet pas d'obtenir des données dans tous les contextes. Le plus important est d'au moins conserver le stock de carbone actuel et d'empêcher le déstockage de carbone. En optant pour ce paradigme, il est alors plus aisé de se projeter sur les mutations du territoire et de prendre en compte leurs impacts potentiels sur le climat.

5. La construction des scénarios de développement urbain

L'estimation de la séquestration du carbone dans les sols agricoles et les forêts du territoire de la CoVe passe par la construction de scénarios prospectifs dessinant les contours du développement urbain et les usages des sols de demain. La principale variable sur laquelle s'appuient les scénarios est la croissance démographique entre aujourd'hui et 2050 permettant d'anticiper la progression de l'enveloppe urbaine, de calculer la densité de la population et des logements, de définir les futures formes d'habitat... L'objectif de base est d'optimiser le stockage et la séquestration du carbone, tout en préservant autant que possible les paysages et en assurant l'accueil de nouveaux habitants désireux de vivre et s'épanouir sur le territoire de la communauté d'agglomération.

Trois trajectoires démographiques ont été retenues pour évaluer les contraintes territoriales en termes de développement urbain :

- +0,3 % par an selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), soit +6815 habitants en 2050 ;
- +0,4 % par an selon le schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), soit +9226 habitants en 2050 ;
- +1 % selon le schéma de cohérence territoriale (SCoT), soit +25 306 habitants en 2050.

En complément, la CoVe a fixé des orientations en vue d'accueillir les nouveaux habitants : 200 ha supplémentaires seront dédiés aux zones d'extension urbaine (essentiellement au détriment d'espaces agricoles), tandis que les « dents creuses », espaces mixtes (jardins, parkings, friches...) appartenant à l'enveloppe urbaine actuelle, seront utilisées pour densifier les logements et donc éviter de gagner du terrain sur les terres agricoles et forestières. La surface des « dents creuses » est estimée à 400 ha sur l'ensemble des 25 communes de la CoVe, dont 112 ha à Carpentras. Ces orientations portent également sur le nombre de logements : 4300 logements sur les zones d'extension urbaine et 7000 logements dans les « dents creuses ». À l'horizon 2050, d'après la CoVe, chaque logement accueillera en moyenne 2,1 personnes. Ainsi, potentiellement, l'extension urbaine et les « dents creuses » auront la capacité d'accueillir 23 730 habitants supplémentaires. Afin de compléter l'approche et d'alimenter les scénarios, des seuils de densités et des formes urbaines ont été fixés. Ceux-ci s'inspirent de documents publiés par les agences d'urbanisme qui visent à limiter la consommation du foncier : 15 logements par ha pour l'habitat individuel, 25 logements par ha pour l'habitat individuel groupé, 50 logements par ha pour l'habitat collectif ou intermédiaire à taille humaine...

À partir de ces indicateurs croisés, les scénarios sont construits et évalués en fonction de l'évolution de l'urbanisation. Dans les nouvelles surfaces urbaines, les scénarios réservent des espaces pour l'installation d'infrastructures (voies d'accès, équipements de loisirs...) susceptibles de structurer le futur territoire. En d'autres termes, les surfaces considérées ne sont pas exclusivement dédiées aux logements. Les scénarios font l'hypothèse que les trajectoires prospectives sont plausibles et donc susceptibles de se réaliser avec une augmentation des surfaces urbaines comprise entre 5 et 10 %. Pour limiter le recul des terres agricoles et forestières, et donc optimiser le stockage et la séquestration du carbone, les nouvelles surfaces urbaines ne dépassent pas 600 ha sur l'ensemble du territoire. Ce chiffre correspond aux orientations de la CoVe, ce qui est aussi en cohérence avec la trajectoire INSEE si la densité actuelle est conservée (Tableau 7).

Le Tableau 7 fournit des indicateurs sur l'évolution des surfaces et densités urbaines selon l'évolution démographique. Les surfaces des zones urbaines où vit la population ont été calculées afin de connaître leur propre densité. Il faut distinguer la densité du territoire de la CoVe (ou communale) et la densité des (nouvelles) zones urbaines qui, en fonction du contexte local, peut atteindre des chiffres élevés. Par ailleurs, les densités des surfaces urbaines dépendent de la répartition spatiale (homogène ou inégale) des habitants : une répartition inégale par zone urbanisée et par commune, comme c'est le cas actuellement, se traduit par une variation importante de la densité. Si la densité des nouvelles zones urbanisées conservent proportionnellement les mêmes écarts de densité par commune qu'aujourd'hui, certains secteurs seront très denses.

Évolutions théoriques des surfaces et densités urbaines sans apport de population	
Nombre d'habitants en 2015	69203
Surface du territoire de la CoVe (en km²/ha)	511 / 51100
Densité de population sur le territoire de la CoVe* en 2015 (par km²)	135
Surfaces urbanisées (en km²/ha, MOS 2014)	61,50 / 6150
Densité de population des surfaces urbanisées* sur le territoire de la CoVe en 2015 (par km², MOS 2014)	1128
Surfaces urbanisées en 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +5 % (en ha)	6460
Écart entre surfaces urbanisées actuelles et 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +5 % (en ha)	310
Densité de population des surfaces urbanisées* sur le territoire de la CoVe en 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +5 % et si maintien de la population de 2015 (par km²)	1074
Surfaces urbanisées en 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +10 % (en ha)	6760

Écart entre surfaces urbanisées actuelles et 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +10 % (en ha)	610		
Densité de population des surfaces urbanisées* sur le territoire de la CoVe en 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +10 % et si maintien de la population de 2015 (par km ²)	1025		
Évolutions démographiques et surfaciques théoriques selon trajectoire démographique			
Évolution démographique moyenne virtuelle par an entre 2015 et 2050	0,3 %	0,4 %	1 %
Trajectoire prospective	INSEE	SRADDET	SCOT
Nombre d'habitants en 2050	76852	79264	95344
Gain de population en 2050	6815	9226	25306
Densité de population sur le territoire de la CoVe* en 2050 (par km ²)	148	153	184
Évolution des surfaces urbanisées en 2050 si volonté de conserver la densité de population actuelle (en %)	9,8	13,3	36,5
Surfaces urbanisées en 2050 si volonté de conserver la densité actuelle (en ha)	6750	6970	8390
Écart entre surfaces urbanisées 2014 (MOS) et 2050 si volonté de conserver la densité de population actuelle (en ha)	600	820	2240
Incidences théoriques sur la densité des surfaces urbanisées			
Densité de population des surfaces urbanisées* sur le territoire de la CoVe en 2050	1207	1236	1423
Densité de population des nouvelles surfaces urbanisées* en 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +5 % (par km ²) → cas où le gain de population est uniquement absorbé par les nouvelles surfaces urbanisées	2216	3000	8230
Densité de population des nouvelles surfaces urbanisées* en 2050 si évolution des surfaces urbanisées de +10 % (par km ²) → cas où le gain de population est uniquement absorbé par les nouvelles surfaces urbanisées	1108	1500	4115
Orientations chiffrées en 2050 fournis par la CoVe (en gras) et calculs associés			
Extension planifiée des zones urbaines (en ha)	200		
Extension planifiée des zones urbaines par rapport aux surfaces urbanisées (en %, MOS 2014)	3,3		
Nombre potentiel de logements programmés dans les zones d'extension urbaine	4300		
Surfaces des « dents creuses » dédiées à l'urbanisation (estimation, en ha)	400 (112 à Carpentras)		
Surfaces des « dents creuses » dédiées à l'urbanisation par rapport aux surfaces urbanisées (en %)	6,5		
Nombre potentiel de logements dans les « dents creuses »	7000		
Nombre d'habitants moyens dans un logement	2,1		
Nombre de logements programmés dans les zones d'extension urbaine + « dents creuses »	11300		
Nombre d'habitants maximum en zone d'extension urbaine	9030		
Nombre d'habitants maximum dans les « dents creuses »	14700		
Nombre d'habitants maximum extension zones urbaines + « dents creuses »	23730		
Surfaces extension planifiée des zones urbaines + « dents creuses » (en ha)	600		
Surfaces extension planifiée des zones urbaines + « dents creuses » dédiées à l'urbanisation par rapport aux surfaces urbanisées (en %)	9,8		
Densité de population* en 2050 si surfaces totales extension planifiée des zones urbaines + « dents creuses » (par km ²)	4199		

*Ce chiffre masque de fortes disparités de densité par commune et par espace urbain/commune (aujourd'hui, des densités sont fortes à Carpentras ou Aubignan par exemple et faibles à Beaumont-du-Ventoux ou la Roque-Alric).

Tableau 7. Évolution des surfaces et densités urbaines selon l'évolution démographique sur le territoire de la CoVe

Dans les scénarios, les nouvelles zones urbanisées (extension planifiée des zones urbaines + « dents creuses ») accueillent à elles seules les nouveaux arrivants, même si des options pour limiter la densité et le grignotage des terres agricoles et forestières sont suggérées. Après analyse et croisement des indicateurs, trois scénarios sont privilégiés et évalués. Les scénarios 1 et 2 portent essentiellement sur la trajectoire INSEE qui est en adéquation avec la volonté de renforcer le stockage et la séquestration du carbone. La trajectoire du SRADDET est également acceptable avec un point de vigilance sur le type d'habitat (scénario 2). La trajectoire du SCOT est envisageable, sous certaines conditions, si la surface totale des zones urbaines est au moins égale à +10 %. Les trois scénarios prospectifs sont simplement des choix pour montrer les incidences sur le stockage et la séquestration du carbone. D'autres voies peuvent être imaginées. Chaque scénario présente des spécificités :

Scénario 1 : évolution démographique de +0,3 % par an et des surfaces urbaines de +5 % – scénario INSEE

Gain de population en 2050 : +6815 habitants.

Surfaces virtuelles des nouvelles zones urbaines en 2050 : +5 %.

Localisation des nouvelles zones urbaines : « dents creuses ».

Étendue surfacique des nouvelles zones urbaines : 300 ha, c'est-à-dire 75 % de la surface des « dents creuses ».

Type de surfaces :

- 80 % de surfaces urbanisées, soit 240 ha répartis sur l'ensemble des communes de la CoVe, habitat de type individuel ou individuel groupé, densité des surfaces urbanisées de 2840 personnes par km² si seules les nouvelles zones urbanisées accueillent les habitants. Si les écarts de densité par zone urbaine et par commune sont maintenus, de fortes disparités de densité seraient conservées¹⁹ ;
- 20 % de surfaces à vocation urbaine « en réserve », à usage agricole temporaire ou permanent (selon évolution démographique), soit 60 ha, développement de l'agroforesterie (peupleraies et prairies), maintien ou implantation de haies (en évitant les végétaux susceptibles de provoquer des allergies respiratoires), mise en œuvre et expérimentations de nouvelles pratiques culturales, absence de pesticides et d'engrais chimiques.

Type d'habitat mixte (rapport respectif 60/40) :

- habitat individuel, hauteur R ou R+1 (au choix), composé notamment de matériaux stockant le carbone (bois par exemple) avec jardins arborés (arbres, haies), buissonnants et partiellement enherbés, parcelles de 400 à 600 m² maximum selon surfaces dédiées à l'espace public et aux services ; bâtiment à énergie passive ou positive ; maisons non accolées ou non jumelées afin de favoriser l'intimité ;
- habitat individuel groupé ou semi-collectif, hauteur R+1 à R+2 ; bâtiment à énergie passive ou positive, avec services, espaces verts et jardins partagés ; surfaces variables des parcelles selon nombre de logements (en théorie, à l'unité, plus grandes que pour l'habitat individuel) et surfaces dédiées à l'espace public et aux services, exclusion de formes urbaines uniformes et répétitives sans intérêt architectural.

De manière générale, quartiers verts (espaces artificiels arborés et buissonnants, sols enherbés) favorisant la sociabilité avec voie piétonne, voies cyclables, commerces, services et loisirs de proximité, partage de l'espace public (espaces verts et jardins partagés par exemple).

Création d'espaces de coworking, directement accessibles en transport(s) en commun, pour limiter les déplacements.

Outre ces mutations, les paysages évolueraient pour tendre vers une augmentation du stockage et de la séquestration du carbone. Globalement, le changement d'occupation des sols serait le suivant (chiffres arrondis) :

- -300 ha de friches, jardins, parkings...²⁰
- -300 ha de vignes
- -200 ha de cultures
- +120 ha de sols artificiels arborés et buissonnants
- +80 ha de sols artificiels enherbés/arbustifs
- +40 ha de sols artificiels imperméabilisés

¹⁹ En termes de stockage et de séquestration de carbone, ce choix aura une incidence, sachant que conserver au maximum le carbone dans les sols est une priorité.

²⁰ Équivalent sols artificiels enherbés/arbustifs

- +200 ha de prairies zones arborées (agroforesterie : peupleraies, prairies)
- +300 ha de forêts de conifères
- +60 ha de forêts mixtes.



Photo d'illustration. Agroforesterie, photo parue dans *Midi Libre*, 11 mai 2019, ©C.-S.F

Possibilité d'optimiser la séquestration du carbone et de réduire les surfaces urbanisées :

- en limitant l'extension de l'habitat individuel et la surface des parcelles (jusqu'à 300-400 m² par exemple), et en privilégiant l'habitat individuel groupé ou semi-collectif (R+1 à R+2) : 60-70 % de surfaces urbanisées au lieu de 80 % au profit de l'agroforesterie ;
- en exploitant les surfaces des « dents creuses » et les zones d'extension urbaine non utilisées, au profit de l'agroforesterie et/ou des espaces forestiers ;
- en réhabilitant des quartiers urbains au cœur ou en périphérie des centres historiques des villes et villages afin d'éviter de grignoter à terme les espaces réservés à l'urbanisation : nouvelles formes d'habitat (habitats collectifs R+2, R+3). Cela permettrait de maintenir les surfaces agricoles : agroforesterie et/ou nouvelles pratiques « stockantes » ;
- en occupant les logements vacants dans les centres-villes et en limitant les résidences secondaires habitées temporairement dans l'année.

En parallèle, sur l'ensemble du territoire de la CoVe, des actions permettent de limiter les effets du changement climatique et préserver la santé des habitants, de la faune et de la flore : nouvelles pratiques agricoles et forestières, amélioration des transports en commun, développement des énergies renouvelables (énergie solaire photovoltaïque notamment) avec production individuelle et collective, changement des modes de consommation et de production...

Bilan du scénario 1 :

- ⇒ augmentation modérée des surfaces urbanisées (+5 %) ;
- ⇒ nouvelles surfaces urbaines uniquement dans les « dents creuses » (surface partielle) : extension limitée et circonscrite ;
- ⇒ impacts mineurs sur les paysages agricoles et forestiers ;

- ⇒ espaces « en réserve » susceptibles d'être réquisitionnés si évolution démographique s'avérant plus forte que prévue : point positif, mais faible anticipation en cas d'accélération de l'évolution démographique ;
- ⇒ accroissement potentielle de la séquestration du carbone sur les secteurs urbanisés tout en limitant le déstockage selon usages et occupation des sols ;
- ⇒ accueil des nouveaux habitants dans un espace urbain attractif mixte composé d'un habitat nouvelle génération favorisant la végétalisation des quartiers et le partage des espaces verts, de forêts, de parcelles agricoles dédiées à l'agroforesterie (mélanges d'arbres et de prairies, bonne fertilité des sols et enrichissement de la matière organique dans les sols, humidité dans les sols, production de biomasse et de bois, système agro-sylvo-pastoral possible avec fertilisation par les animaux) ;
- ⇒ habitat de type individuel ou individuel groupé parfaitement intégré au paysage, paysage semi-ouvert (éviter les murs de clôture) et environnement urbain agréable ;
- ⇒ possibilité de développer des écoquartiers ;
- ⇒ distance entre le domicile et le lieu de travail, les commerces, les services et les loisirs réduite, soit une hausse modeste des GES ;
- ⇒ augmentation des surfaces en agroforesterie et forestières (au détriment des vignes et cultures) ;
- ⇒ pesticides et engrais chimiques non utilisés au sein des jardins, des espaces verts et agricoles pour préserver la santé des habitants, de la faune et de la flore...

Scénario 2 : évolution démographique de +0,3 % par an et des surfaces urbaines de 10 % – scénarios INSEE et SRADET

Gain de population en 2050 : +6815 habitants, avec possibilité d'accueillir jusqu'à 9240 personnes sans changer de stratégie de développement territorial.

Surfaces virtuelles des nouvelles zones urbaines en 2050 : +9,8 %.

Localisation des nouvelles zones urbaines : zones d'extension urbaine + « dents creuses ».

Étendue surfacique des nouvelles zones urbaines : respectivement 200 et 400 ha, soit 600 ha au total.

Type de surfaces :

- 40 % de surfaces urbanisées, soit 240 ha répartis sur l'ensemble des communes de la CoVe, habitat de type individuel ou individuel groupé, densité des surfaces urbanisées de 2840 personnes par km² si +6815 habitants vs 3850 personnes si +9240 habitants en 2050, si seules les nouvelles zones urbanisées accueillent les habitants. Si les écarts de densité par zone urbaine et par commune sont maintenus, de fortes disparités de densité seraient conservées ;
- 20 % de surfaces à vocation urbaine « en réserve », à usage agricole temporaire ou permanent (selon évolution démographique), soit 120 ha, développement de l'agroforesterie (peupleraies et prairies), maintien ou implantation de haies (en évitant les végétaux susceptibles de provoquer des allergies respiratoires), mise en place et expérimentations de nouvelles pratiques culturales, absence de pesticides et d'engrais chimiques ;
- 10 % de surfaces dédiées au développement des énergies renouvelables (centrales photovoltaïques au sol) sur prairies ou zones herbacées, à destination des habitants et des activités économiques, soit 60 ha ;
- 30 % de surfaces de forêts de conifères (pins d'Alep, pin parasol, genévrier, cèdres...) ou mixtes, soit 180 ha.

Type d'habitat mixte (rapport respectif 30/70) :

- habitat individuel, hauteur R ou R+1 (au choix), composé notamment de matériaux stockant le carbone (bois par exemple) avec jardins arborés (arbres, haies), buissonnants et enherbés, parcelles de 400 à 600 m² maximum selon surfaces dédiées à l'espace public et aux services ; bâtiment à énergie passive ou positive ; maisons non accolées ou jumelées afin de favoriser l'intimité ; exclusion de formes urbaines uniformes et répétitives sans intérêt architectural ;

- habitat individuel groupé ou semi-collectif, hauteur R+1 à R+2 ; bâtiment à énergie passive ou positive, avec services, espaces verts et jardins partagés ; surfaces variables des parcelles selon nombre de logements (en théorie, à l'unité, plus grandes que pour l'habitat individuel) et surfaces dédiées à l'espace public et aux services.

De manière générale, quartiers verts favorisant la sociabilité (espaces artificiels arborés et buissonnants, sols enherbés) avec voie piétonne, voies cyclables, commerces, services et loisirs de proximité, partage de l'espace public (espaces verts et jardins partagés par exemple) ;

Création d'espaces de coworking, directement accessibles en transport(s) en commun, pour limiter les déplacements.



Photo d'illustration. Paysages mixtes (vignes, oliviers, haies, forêt, habitat individuel groupé), Beaumes-de-Venise, juin 2019, ©GeographR

Outre ces mutations, les paysages évolueraient pour tendre vers une augmentation du stockage et de la séquestration du carbone. Globalement, le changement d'occupation des sols serait le suivant (chiffres arrondis) :

- -400 ha de friches, jardins, parkings...²¹
- -300 ha de vignes
- -200 ha de cultures
- +60 ha de sols artificiels arborés et buissonnants
- +160 ha de sols artificiels enherbés/arbustifs : 140 ha dans nouvelles zones urbaines et 20 ha dans zones urbaines existantes (végétalisation, réhabilitation de quartiers)
- +30 ha de sols artificiels imperméabilisés : +50 ha dans nouvelles zones urbanisées, -20 ha après végétalisation de zones urbaines existantes (réhabilitation de quartiers)
- +60 ha de prairies ou zones herbacées
- +200 ha de prairies zones arborées (agroforesterie : peupleraies, prairies)
- +300 ha de forêts de conifères
- +90 ha de forêts mixtes.

Possibilité d'optimiser la séquestration du carbone et de réduire les surfaces urbanisées :

²¹ Équivalent sols artificiels enherbés/arbustifs

- en limitant l'extension de l'habitat individuel et la surface des parcelles (jusqu'à 400 m² par exemple), et en privilégiant l'habitat individuel groupé ou semi-collectif (R+1 à R+2) : 30 % de surfaces urbanisées au lieu de 40 % au profit des forêts de conifères ou mixtes, de l'agroforesterie ;
- en réhabilitant des quartiers urbains au cœur ou en périphérie des centres historiques des villes et villages afin d'éviter de grignoter à terme les espaces réservés à l'urbanisation : nouvelles formes d'habitat (habitats collectifs R+2, R+3). Cela permettrait de maintenir les surfaces agricoles : agroforesterie et/ou nouvelles pratiques « stockantes » ;
- en occupant les logements vacants dans les centres-villes et en limitant les résidences secondaires habitées temporairement dans l'année.

En parallèle, sur l'ensemble du territoire de la CoVe, des actions permettent de limiter les effets du changement climatique et préserver la santé des habitants, de la faune et de la flore : nouvelles pratiques agricoles et forestières, amélioration des transports en commun, développement des énergies renouvelables (énergie solaire photovoltaïque notamment) avec production individuelle et collective, changement des modes de consommation et de production...

Bilan du scénario 2 :

- ⇒ développement territorial équilibré, harmonieux et résilient ;
- ⇒ augmentation limitée des surfaces urbaines mixtes ;
- ⇒ accroissement de la séquestration du carbone sur les secteurs urbanisés tout en limitant le déstockage selon usages et occupation des sols ;
- ⇒ augmentation des surfaces en agroforesterie et forestières (au détriment des vignes et cultures qui stockent et séquestrent moins de carbone) ;
- ⇒ accueil des nouveaux habitants dans un espace urbain attractif mixte composé d'un habitat nouvelle génération favorisant la végétalisation des quartiers et le partage des espaces verts, de forêts, de parcelles agricoles dédiées à l'agroforesterie (mélanges d'arbres et de prairies, bonne fertilité des sols et enrichissement de la matière organique dans les sols, humidité dans les sols, production de biomasse et de bois, système agro-sylvo-pastoral possible avec fertilisation des animaux) ;
- ⇒ habitat de type individuel ou individuel groupé parfaitement intégré au paysage, paysage semi-ouvert et environnement urbain agréable ;
- ⇒ possibilité de développer des écoquartiers ;
- ⇒ développement des énergies renouvelables ;
- ⇒ distance entre le domicile et le lieu de travail, les commerces, les services et les loisirs, source potentielle d'émissions de GES, mais performance des transports en commun (énergie propre, haute fréquence, à la demande, confortables, connectés...) limitant les émissions de GES et encourageant les usagers à réduire leurs trajets en voiture ;
- ⇒ pesticides et engrais chimiques non utilisés au sein des jardins, des espaces verts et agricoles pour préserver la santé des habitants, de la faune et de la flore... ;
- ⇒ scénario 1 également applicable à l'évolution démographique du SRRADDET (+0,4 % par an) : pour éviter la saturation de l'espace, privilégier un rapport 20/80 entre l'habitat individuel et l'habitat individuel groupé ou semi-collectif, par exemple.

Scénario 3 : évolution démographique de +1 % par an et des surfaces urbaines de 10 % – scénario SCOT

Gain de population en 2050 : +25 306 habitants.

Surfaces virtuelles des nouvelles zones urbaines en 2050 : +9,8 %.

Localisation des nouvelles zones urbaines : zones d'extension urbaine + « dents creuses ».

Étendue surfacique des nouvelles zones urbaines : respectivement 200 et 400 ha, soit 600 ha au total.

Type de surfaces : 100 % de surfaces urbanisées, soit 600 ha répartis sur l'ensemble des communes de la CoVe, habitat de type individuel groupé (majoritairement) et individuel, densité de 4218 personnes par km² si seules les nouvelles zones urbanisées accueillent les habitants. Si les écarts de densité par zone urbaine et par commune sont maintenus, de fortes disparités de densité seraient conservées.

Type d'habitat mixte (rapport respectif 20/80) :

- habitat individuel, hauteur R à R+1, composé notamment de matériaux stockant le carbone (bois par exemple) avec jardins arborés (arbres, haies), buissonnants et partiellement enherbés, parcelles de 300-400 m² maximum selon surfaces dédiées à l'espace public et aux services ; bâtiment à énergie passive ou positive ; exclusion de formes urbaines uniformes et répétitives sans intérêt architectural ;
- habitat individuel groupé ou semi-collectif, hauteur R+1 à R+2 ; bâtiment à énergie passive ou positive, avec services, espaces verts et jardins partagés ; surfaces variables des parcelles selon nombre de logements (au moins 25 logements par ha) et surfaces dédiées à l'espace public et aux services.

De manière générale, quartiers verts favorisant la convivialité (espaces artificiels enherbés/arbustifs) avec voie piétonne, voies cyclables, commerces, services et loisirs de proximité, partage de l'espace public (espaces verts et jardins partagés par exemple).

Création d'espaces de coworking, directement accessibles en transports en commun, pour limiter les déplacements.

Outre ces mutations, les paysages évolueraient pour tendre vers une augmentation du stockage et de la séquestration du carbone. Globalement, le changement d'occupation des sols serait le suivant (chiffres arrondis) :

- -400 ha de friches, jardins, parkings...²²
- -400 ha de vignes
- -300 ha de cultures
- +410 ha de sols artificiels enherbés/arbustifs
- +100 ha de sols artificiels arborés et buissonnants
- +90 ha de sols artificiels imperméabilisés
- +300 ha de prairies zones arborées (agroforesterie : peupleraies, prairies)
- +100 ha de forêts de conifères
- +100 ha de forêts mixtes.

Possibilité d'optimiser la séquestration du carbone et de réduire les surfaces urbanisées :

- en privilégiant uniquement un habitat individuel groupé (majoritaire) et un habitat collectif offrant une ambiance « village » (au moins 50 logements par ha), hauteur R+1 à R+2 : 70 % de surfaces urbanisées, 30 % de terres agricoles (agroforesterie), forestières (conifères) ou mixtes ;
- en réhabilitant des quartiers urbains au cœur ou en périphérie des centres historiques des villes et villages afin d'éviter de grignoter à terme les espaces réservés à l'urbanisation : nouvelles formes d'habitat (habitats collectifs R+2, R+3). Cela permettrait de maintenir les surfaces agricoles : agroforesterie et/ou nouvelles pratiques « stockantes » ;
- en occupant les logements vacants dans les centres-villes et en limitant les résidences secondaires habitées temporairement dans l'année.

En parallèle, sur l'ensemble du territoire de la CoVe, des actions permettent de limiter les effets du changement climatique et préserver la santé des habitants, de la faune et de la flore : nouvelles

²² Équivalent sols artificiels enherbés/arbustifs

pratiques agricoles et forestières, amélioration des transports en commun, développement des énergies renouvelables (énergie solaire photovoltaïque notamment) avec production individuelle et collective, changement des modes de consommation et de production...

Bilan du scénario 3 :

- ⇒ possibilité de répondre à la forte augmentation de la population (+27 % par rapport à 2015) si accroissement de la densité des zones urbaines ;
- ⇒ fort dynamisme démographique susceptible de renforcer l'économie locale ;
- ⇒ habitat de type individuel ou individuel groupé intégré au paysage, paysage semi-ouvert et environnement urbain assez agréable ;
- ⇒ accueil des nouveaux habitants dans un espace urbain relativement attractif, avec espaces verts, de loisirs et jardins partagés, mais mutations des paysages en périphérie des villes et villages (ambiance plus urbaine même si les apparences peuvent masquer ce caractère) ;
- ⇒ le nombre de logements maximum par la CoVe serait insuffisant : 750 logements supplémentaires seraient nécessaires, mais cette contrainte est acceptable ;
- ⇒ possibilité de développer des écoquartiers ;
- ⇒ pression sur le prix du foncier ;
- ⇒ augmentation des surfaces en agroforesterie et forestières (au détriment des vignes et cultures qui stockent et séquestrent moins de carbone) ;
- ⇒ séquestration du carbone réduite et déstockage lors de la transformation des espaces ;
- ⇒ distance entre le domicile et le lieu de travail, les commerces, les services et les loisirs, source potentielle d'émissions de gaz à effet de serre, mais performance des transports en commun (énergie propre, haute fréquence, à la demande, confortables, connectés...) limitant les émissions de GES et encourageant les usagers à réduire leurs trajets en voiture ;
- ⇒ pesticides et engrais chimiques non utilisés au sein des espaces verts pour préserver la santé des habitants, de la faune et de la flore...

Ces trois scénarios présentent des avantages et des inconvénients. Le scénario 2 est le plus équilibré et présente des garanties pour les trajectoires INSEE et SRADDET. Une évaluation est proposée dans le Tableau 8 :

Évolution démographique moyenne virtuelle par an entre 2015 et 2050	0,3 %	0,4 %	1 %
Trajectoire prospective	INSEE	SRADDET	SCOT
Évaluation selon évolution démographique si progression des surfaces urbanisées de +5 %	scénario 1	-	-
Évaluation selon évolution démographique si progression des surfaces urbanisées de +10 %	scénario 2	scénario 2	scénario 3

scénario favorable	scénario limite	Scénario défavorable
--------------------	-----------------	----------------------

Tableau 8. Évaluation des trajectoires prospectives en termes d'accroissement démographique et de stockage/séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers

Ces scénarios prospectifs se matérialisent par un changement d'occupation des sols et modifient par conséquent le stockage et la séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers et plus largement à l'échelle territoriale.

6. Quelle évolution du stock et de la séquestration du carbone entre aujourd'hui et 2050 selon les scénarios prospectifs ?

Les mutations du territoire déclinées par les scénarios prospectifs pour accompagner les potentielles évolutions démographiques de la CoVe ont permis de calculer concrètement les changements d'occupation des sols entre aujourd'hui et 2050 (Annexe 3). À partir du volet « flux » de l'outil ALDO (se basant sur des flux de référence unitaires), il est possible de modéliser les flux totaux de carbone

intrants et/ou sortants associés aux changements d'affectation des sols. Le Tableau 9 présente pour chaque type d'occupation des sols (niveau 1 de la nomenclature ALDO, Annexe 1) les flux de carbone (tC-an-1) potentiels en 2050. Un flux positif représente un stockage (séquestration), alors qu'un flux négatif représente un déstockage (émission). Il faut noter que l'estimation des flux liés aux produits bois a fait l'objet d'une autre estimation (Tableau 11).

Les forêts, les prairies (tous types confondus) et les sols artificiels arborés sont les occupations des sols qui stockent le plus de carbone. Ceci s'explique notamment par le fait qu'ils interagissent avec deux réservoirs (stockage), à savoir le sol et la biomasse. Le fort potentiel de séquestration des forêts (> 17100 tC/an) est un fait remarquable à retenir. Les forêts représentent un puits de carbone majeur que la CoVe doit préserver et gérer à l'échelle de son territoire. La séquestration du carbone dans les sols artificiels arborés est plus importante dans le scénario 2 (459,3 tC/an) grâce à une extension de 200 hectares, tandis que la séquestration du carbone dans les prairies est plus importante dans le scénario 1 en raison de la transformation de 260 ha de cultures en prairies arborées. À l'inverse, les sols artificiels imperméabilisés déstockent du carbone entre -90 tC/an (scénario 3) et -153 Tc/an (scénario 1). Enfin, les cultures, les zones humides, les vergers et les vignes ne stockent, ni n'émettent de carbone dans ALDO car ce sont des types d'occupation des sols dont la surface reste inchangée (zones humides) ou qui reculent au profit d'autres types d'occupation des sols (cultures, vignes, vergers). La croissance de la biomasse (cultures) peut contribuer à la séquestration annuelle du carbone, surtout en privilégiant des pratiques vertueuses (lire conclusion générale recommandations), mais dans des proportions limitées.

Occupation des sols	Flux de séquestration (tC·an-1)		
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Cultures	0	0	0
Prairies	206,45	129,66	130,51
Zones humides	0	0	0
Vergers	0	0	0
Vignes	0	0	0
Sols artificiels arborés	367,20	459,34	288,27
Sols artificiels enherbés/arbustifs	23,00	-39,30	12,37
Sols artificiels imperméabilisés	-153,43	-115,51	-90,10
Forêt	17160,72	17228,51	17152,94

Tableau 9. Flux de carbone annuel dans les sols et la biomasse par type d'occupation des sols en 2050 au regard des trois scénarios prospectifs proposés à l'échelle de la CoVe. Un flux positif représente un stockage (séquestration), un flux négatif représente un déstockage (émission)

Le changement d'occupation des sols proposé par les trois scénarios prospectifs vise à accompagner la hausse démographique à l'échelle de la CoVe, tout en augmentant de façon réaliste la séquestration du carbone dans les sols et la biomasse. Aucun scénario ne présente un stock total très supérieur. En effet, les flux de carbone annuels attendus dès 2050 sont compris entre 17494 tC/an et 17663 tC/an (Tableau 10). Ceci s'explique essentiellement par les faibles surfaces modifiées quel que soit le scénario (de 800 ha pour le scénario 1 à 1100 ha pour le scénario 2). Ce résultat est toutefois encourageant dans le sens où les différentes évolutions démographiques ne posent pas de souci majeur en termes d'aménagement et d'adaptation à l'horizon 2050. Le territoire sera capable d'accueillir les nouveaux arrivants tout en séquestrant du carbone dans les sols et la biomasse à condition d'adapter la politique d'aménagement du territoire. À titre d'exemple, le scénario 3, qui préconise la transformation de 300 ha de vignes en prairies arborées, n'aboutit pas à un stockage aussi élevé en prairie que le scénario 1 qui transforme 260 ha de cultures en prairies arborées. Cet exemple illustre l'importance du choix des mutations entre deux types d'occupation des sols. D'autre part, les scénarios ont montré la séquestration potentielle des sols artificiels arborés. Ce résultat est positif car il se traduit par une plus grande végétalisation des espaces urbains. Ceci passe une multiplication des arbres dans les rues, les parcs, mais également une végétalisation des zones

résidentielles qui permettraient d'augmenter la construction d'habitats à étages, et donc la densification urbaine au détriment de l'extension, tout en garantissant une certaine qualité de vie dans un cadre verdoyant.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Flux total de C sol et litière (tC·an-1)	143,42	252,42	151,09
Flux total de CO₂ sol et litière (tCO₂·an-1)	525,89	925,53	554
Flux total de C biomasse (tC·an-1)	17460,52	17410,27	17342,9
Flux total de CO₂ biomasse (tCO₂·an-1)	64021,92	63837,67	63590,65
Flux total de C (tC·an-1)	17603,94	17662,69	17493,99
Flux total de CO₂ (tCO₂·an-1)	64547,81	64763,2	64144,65

Tableau 10. Flux totaux de carbone dans les sols et la biomasse en 2050 au regard des trois scénarios prospectifs proposés à l'échelle de la CoVe. Un flux positif représente un stockage (séquestration), un flux négatif représente un déstockage (émission)

Au-delà de la modification de l'occupation des sols selon les scénarios prospectifs, la production et la consommation de produits bois peut aussi avoir un impact sur les flux de carbone. Ces flux associés au réservoir de biomasse sont représentés par le bois d'œuvre (BO) et le bois d'industrie (BI) destinés au sciage pour le premier et à la production de papier et de panneaux pour le second. L'outil ALDO calcule les flux associés aux produits bois à l'échelle de l'EPCI selon deux approches :

1. l'approche « production » (répartition selon récolte) calcule les flux de carbone annuels des produits bois en multipliant la part de la récolte de l'EPCI au sein de la récolte française par la valeur du puits total de carbone contenu dans les produits bois en France ;
2. l'approche « consommation » (répartition selon habitants) calcule les flux de carbone annuels des produits bois en multipliant le stock national de produits par la part de l'EPCI dans la population nationale.

Le choix de ne pas inclure directement les produits bois dans les divers scénarios est expliqué par le fait que leur évolution dépendra de plusieurs facteurs :

- **le changement climatique** : il a des effets significatifs sur les milieux naturels, parfois déjà visibles, et se traduisent en forêt par le recul, voire le dépérissement d'essences (Sapin pectiné par exemple), la montée en altitude ou le déplacement en latitude. Le réchauffement climatique entraîne également l'apparition de nouvelles bactéries et maladies parasitaires, parfois difficile à anticiper, altérant le bois. Pour lutter contre ces dernières, les gestionnaires mettent tout en œuvre pour protéger les forêts ou les régénérer. La coupe d'îlots forestiers autour du ou des foyers de contamination peut provoquer une diminution des surfaces forestières et donc du stockage du carbone ;
- **les risques naturels** : le département du Vaucluse est soumis à de nombreux risques naturels qui peuvent engendrer des bouleversements au niveau des forêts. Les incendies, les pluies diluviennes et les inondations sont en effet des facteurs à prendre en compte. Les incendies, par exemple, menacent les forêts de disparition sur de grandes surfaces. Aujourd'hui, de manière générale, le nombre d'incendies a diminué par rapport au passé grâce aux systèmes de défense mis en œuvre. Mais avec l'allongement de la période estivale, la répétition des fortes chaleurs, des canicules et des sécheresses à l'avenir, les grands incendies sont appelés à dévaster de grandes surfaces forestières jusqu'en altitude. Les événements extrêmes, comme les pluies diluviennes et les inondations, appelés eux aussi à devenir plus fréquents avec le changement climatique, aggraveront les processus de ruissellement et d'érosion des sols. La perte de sol en surface et le lessivage entraînent un

appauvrissement des sols déjà relativement pauvres et peu épais en région méditerranéenne ;

- **la réglementation en matière de construction** : le bois utilisé pour la construction (habitat, meubles, etc.) est une source de séquestration du carbone. Pour réellement profiter de ce potentiel, la réglementation en termes d'urbanisme au sein du territoire de la CoVe doit évoluer. Les mesures d'incitation visant la construction en bois sont à encourager. Les plans locaux d'urbanisme (PLU) doivent clairement afficher des objectifs de constructions en bois (bâtiments publics et privés, maisons individuelles...) au détriment de matériaux composés de granulats, sable, etc., comme le béton ou le crépi. La réglementation pour la construction varie à l'échelle de la CoVe. Dans certains cas, la construction de maisons en bois n'est pas autorisée, même si des constructions exemplaires en bois local, favorisant la séquestration du carbone, tendent à se multiplier ;
- **l'acquisition des données** : contrairement aux mutations de l'occupation des sols basée sur des bases de données cartographiques complètes et existantes (MOS), le calcul de l'évolution des produits bois à l'échelle locale requiert la constitution d'une base de données spécifique aux produits bois actuellement inexistante. Ce travail dépasse le temps alloué à cette étude dans la mesure où elle demande de récolter des données provenant de tous les acteurs de la filière bois (ONF, CNPF, IGN, scieries, papeteries, etc.).

Vu ces nombreux facteurs limitants, il a été décidé d'utiliser l'approche « consommation » en se basant sur l'évolution démographique annuelle proposée dans les trois scénarios prospectifs. Comme ce calcul prend également en compte la population nationale, cette dernière a été recalculée annuellement de 2019 à 2050 en se basant sur les projections de population de l'INSEE en 2050 (70 millions d'habitants en France métropolitaine). Les valeurs affichées dans le Tableau 11 permettent d'évaluer le potentiel de séquestration théorique total des produits bois à horizon 2050.

Carbone total séquestré par les produits bois entre 2019 et 2050 (tC)		
selon évolution démographique du scénario 1	selon évolution démographique du scénario 2	selon évolution démographique du scénario 3
14643,97	14874,67	16193,73

Tableau 11. Stocks de carbone potentiels associés aux produits bois calculés à partir des flux annuels de 2019 à 2050. Le calcul des flux prend en compte l'évolution démographique annuelle entre 2019 et 2050 à l'échelle de la CoVe (selon les trois scénarios) et à l'échelle nationale (projections INSEE)

Le potentiel de séquestration des produits bois est non négligeable même si l'évolution du flux année après année demeure assez faible quel que soit le scénario (de 446 tC/an en 2019 à 469 tC/an en 2050 pour le scénario 1 ; de 446 tC/an en 2019 à 574 tC/an en 2050 pour le scénario 3). Ces estimations seraient à affiner avec notamment un travail spécifique sur la récolte de données locales sur toute la filière bois permettant d'alimenter l'approche « production » d'ALDO.

Finalement, quel que soit le scénario choisi, la séquestration du carbone à horizon 2050 varie peu et demeure relativement faible. *A contrario*, les émissions de GES à venir peuvent très fortement varier en fonction du scénario d'évolution démographique. La séquestration du carbone ne permettra pas d'absorber toutes les émissions de GES à l'échelle de la CoVe. En revanche, de nombreuses solutions existent pour d'une part, conserver le stock de carbone actuel et d'autre part, l'accroître, même en faibles quantités. Le stockage du carbone demeure une solution non durable, mais à une période où le changement climatique met en péril l'évolution de nos sociétés, toutes les pistes contribuant au maintien de l'équilibre des écosystèmes et de la biodiversité doivent être mises en application.

Conclusion générale et recommandations

Ce rapport technique met en lumière les différentes méthodes d'estimation, l'évolution récente de l'occupation des sols sur le territoire de la CoVe (entre 2001 et 2014), les actuels stocks de carbone par type de paysage et les flux de séquestration. Les forêts, l'agroforesterie, les prairies permanentes et les cultures pérennes sont les composantes qui stockent le plus de carbone grâce à leur potentiel et/ou leur surface. Privilégier les produits bois est aussi une solution à condition de généraliser les constructions en bois (habitat, locaux d'entreprises, établissements scolaires...), sachant que le territoire de la CoVe a la capacité de fournir du bois local de qualité pour de nombreux usages (chauffage, construction, mobilier urbain...). L'utilisation du bois régional ou du bois des Alpes, par exemple, est aussi une option. Les espaces végétalisés, les cultures annuelles et les prairies temporaires montrent aussi leur potentiel. Augmenter leurs surfaces pour renforcer le stockage et la séquestration du carbone est une priorité. L'évolution des pratiques agricoles et forestières, la réorganisation des usages des sols et de l'espace sont aussi de puissants leviers pour piéger davantage de carbone ces prochaines décennies et atteindre, voire dépasser les seuils réglementaires. Les choix d'urbanisme seront également déterminants : les espaces urbains enherbés, buissonnants et arborés seront des alliés pour piéger davantage de carbone par exemple. Il faut absolument éviter les espaces artificialisés et minéralisés sur de grandes surfaces. La verdure aura aussi l'avantage de limiter les îlots de chaleur urbains dont les enjeux en termes de santé publique et de confort des habitants sont essentiels.

Les résultats montrent que le territoire de la CoVe a une importante capacité de stockage et de séquestration du carbone. Les flux annuels ne compensent toutefois pas les émissions locales de GES annuelles (249 kteq CO₂ en 2015, chiffres AtmoSud), tous secteurs confondus. Mais les sols agricoles et les forêts n'ont pas vocation à compenser la totalité des émissions de carbone provenant des activités humaines : les espaces urbanisés doivent également se réinventer en émettant moins de polluants, les modes de transport évoluer, les industries se transformer, les modes de consommation profondément changer... Tout est lié et chaque mesure visant à renforcer le stockage et la séquestration du carbone a son importance, d'autant que la CoVe connaîtra une évolution démographique significative comprise entre +6815 et +25306 habitants par rapport à 2015, selon les scénarios prospectifs, d'ici 2050. L'objectif principal est de protéger la population et de réduire sa vulnérabilité face aux risques climatiques tout en préservant l'état de l'atmosphère. L'urgence d'agir est grande dans la mesure où le changement climatique en cours est rapide : si les émissions de GES dans l'atmosphère ne diminuent pas massivement ces 10 prochaines années à l'échelle globale et locale, les conditions climatiques deviendront très contraignantes à l'avenir avec une hausse constante de la température de l'air, des printemps et des étés très chauds, des événements extrêmes plus fréquents (sécheresses, canicules, pluies intenses, incendies...). En région méditerranéenne, la variabilité climatique interannuelle est aussi un facteur déterminant. En d'autres termes, plus le temps passe, plus il sera difficile de conserver une agriculture variée, de maintenir la diversité des espèces forestières, d'assurer les besoins en eau, de planter des arbres dans les espaces urbains...

L'estimation du stockage et de la séquestration du carbone dans les sols agricoles, les forêts et les produits bois 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. Pour limiter les incertitudes, il est important d'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 aussi 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 local pour progresser et contribuer à la baisse des GES dans l'atmosphère. Les outils opérationnels pour évaluer la séquestration du carbone peuvent être améliorés par l'incrémentation de valeurs de stock et de flux unitaires 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 collaborations entre les services de l'État, les collectivités, les sphères scientifiques et techniques. 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 Provence-Alpes-Côte d'Azur, 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, avec une correspondance entre les nomenclatures multi-dates. 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.

Sur le territoire de la CoVe, faute de mesures *in situ* généralisées, l'utilisation de l'outil ALDO, développé par l'ADEME et ses partenaires, mis à disposition fin 2018, a été privilégiée afin d'estimer les stocks et les flux de carbone. En modifiant l'occupation du sol et en ajustant les paramètres d'entrée, des indicateurs sont proposés afin de suivre l'évolution des stocks et des flux entre aujourd'hui et 2050 selon trois scénarios prospectifs ne remettant pas en cause la croissance démographique prévue par l'INSEE, le SRADDET ou le SCOT, et volontairement basés sur des trajectoires réalistes. Les choix en matière d'urbanisme seront décisifs, même si les variations de stock et flux entre les scénarios ne favorisent pas clairement une voie unique dans la mesure où l'urbanisation des dents creuses et des zones d'extension urbaine (villes et villages) concerne des surfaces limitées à l'échelle du territoire. En outre, dans les scénarios choisis, les terres agricoles et forestières sont majoritairement conservées pour des raisons économiques, environnementales, sociales, culturelles, patrimoniales, esthétiques... Cela dit, pour optimiser le stockage et la séquestration du carbone, il convient de penser le territoire de manière différente tout en préservant l'identité des paysages qui fait la réputation de ce territoire blotti entre Comtat Venaissin et Ventoux. Des mesures d'adaptation au changement climatique et d'atténuation des GES sont préconisées ci-après, même si la décision de les mettre en œuvre reviendra aux acteurs territoriaux, des élus aux citoyens. Leur application dépendra de la concertation locale, de l'engagement de tous, de mesures incitatives, de la volonté politique de rendre son territoire désirable et durable, de la solidarité collective... Tout cela va se traduire par de nouveaux aménagements, une évolution des paysages, un habitat plus économe (énergie passive ou positive), de nouvelles pratiques agricoles et forestières, des choix économiques moins énergivores, une évolution des mentalités et des habitudes sociales, une agriculture plus respectueuse de la nature et l'homme, une gestion territoriale plus axée sur la santé et la qualité de vie... Ces changements sont très majoritairement positifs et prometteurs (protection de la population, préservation de la biodiversité, rayonnement du territoire, dynamisme de l'économie locale, baisse de la pollution de l'air...).

Afin d'accompagner les acteurs locaux dans leurs choix, une série de recommandations est formulée à partir de la littérature et des spécificités du territoire de la CoVe. Est incluse également dans cette série, une sélection de conclusions issues de l'atelier « séquestration du carbone » organisé par la CoVe (5 juillet 2019, Caromb), et de préconisations proposées lors du forum ouvert « Face au changement climatique Bâtissons ensemble une agriculture d'avenir pour le Ventoux... » (26 mars 2019 à Mazan).

Série de recommandations pour renforcer le stockage et la séquestration du carbone à l'échelle de la CoVe :

Agriculture

- maintenir et développer les prairies permanentes et temporaires ;
- diminuer le travail du sol : éviter de labourer ou stopper le retournement des prairies, par exemple ;
- convertir les terres arables en prairies permanentes pour stocker deux fois plus de carbone ;
- pratiquer des rotations incluant des légumineuses ;
- développer l'agroforesterie : associer les arbres aux cultures (des expérimentations oliviers-vignes sont en cours par exemple) et/ou l'élevage (lire aussi le volet forêt) + partage d'expériences et organisation de formations pour aider et accompagner les agriculteurs ;
- maintenir, planter et valoriser les haies, les densifier en choisissant des espèces limitant les allergies respiratoires ;
- diversifier les variétés de cultures pour limiter les risques agronomiques ou climatiques ;
- de manière générale, préserver et protéger les sols agricoles ;
- restaurer les restanques pour enrichir les sols ;
- réduire les apports d'azote de synthèse car leur fabrication contribue aux émissions de CO₂ ;
- trouver des alternatives au brûlage des déchets verts : recyclage, broyage... ;
- sélectionner des cépages résistants aux fortes chaleurs, à la répétition et l'intensité des périodes de sécheresses ;
- mieux gérer les émissions de CO₂ liées à la vinification : à l'échelle de la CoVe, la vinification contribue à près de 5 % des émissions totales de GES²³. Des solutions de stockage (compression, liquéfaction...) sont à l'étude, mais encore non matures. Le coût de stockage dans les cuves pose aussi un problème financier. Des pistes tendant vers la réutilisation du CO₂ seraient aussi envisageables : inertage (remplacer l'air ambiant contenu dans la cuve par un gaz neutre, protection du vin de l'oxydation), carbonication des vins (influence sur la robe, les arômes et la texture du vin sans recourir au soufre), revente du carbone à des entreprises spécialisées... ;
- enherber de manière permanente les vignobles et augmenter la surface enherbée des cultures en général ;
- favoriser l'agriculture biologique pour limiter les intrants et préserver la santé des sols + proposer des mesures incitatives et un service accompagnement aux agriculteurs ;
- éviter l'irrigation excessive qui a tendance à déstocker le carbone et à émettre du protoxyde d'azote (GES) ;
- effectuer des amendements pour améliorer les propriétés physiques des sols ;
- semer des engrais verts ;
- apporter des produits résiduels organiques ;
- composter les déchets verts et le fumier animal : apport de matière organique ;
- 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 ;
- restaurer les terres dégradées, notamment les espaces ouverts (garrigues par exemple) ;
- encourager les circuits courts ;
- rationaliser les parcours de livraison ;
- développer les cultures pour les matériaux biosourcés (chanvre, lavande, lin...) : isolation des bâtiments ;

²³ La production d'un litre de vin émet 44 litres de CO₂. La production de vin à l'échelle du Ventoux émet environ 3700 tonnes de carbone par an (propos recueillis lors du forum ouvert à Mazan).

- 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 ;
- réduire la consommation d'énergie des engins agricoles (moteurs électriques, éco-conduite...) et limiter leur passage sur les parcelles ;
- produire de l'énergie sur sites (énergies renouvelables) ;
- entretenir régulièrement les engins agricoles ;
- inventorier et capitaliser les pratiques existantes afin de mieux diffuser et valoriser les nouvelles pratiques agricoles ;
- fédérer les groupes d'agriculteurs à l'échelle locale pour stimuler et encourager le changement de pratiques ;
- mener des actions de communication au travers des organisations professionnelles et associer les établissements d'enseignement agricole pour former les jeunes générations aux nouvelles pratiques ;
- faire évoluer la réglementation : date de fin d'irrigation selon variétés, par exemple...

Les leviers d'actions de la filière agricole sont donc multiples. Leur efficacité dépendra de la combinaison des actions et leur massification à l'échelle du territoire de la CoVe.



©GeographR

Forêt

- éviter d'urbaniser les espaces forestiers ou de couper les forêts sans compensation afin d'éviter de déstocker immédiatement des volumes importants de CO₂ par hectare (biomasse + sol) ;
- pour l'agroforesterie, privilégier des essences d'arbres favorisant le maintien de l'eau dans le sol et l'humidité, un ombrage ne limitant pas la photosynthèse au niveau des cultures, l'apport en matière organique, la richesse des sols... ;
- encourager les systèmes agro-sylvo-pastoraux : association poules-arbres ou ovins-arbres par exemple (complémentarité : fertilisation par les animaux, auxiliaires de nombreux ravageurs, ombrage sur les parcours) ;
- planter des arbres dans les espaces urbains : pour motiver les citoyens, proposer une animation à l'échelle locale ;
- encourager les collectivités à acquérir des espaces forestiers pour optimiser leur gestion, le stockage et la séquestration du carbone dans les sols et la biomasse ;
- augmenter la part des forêts privées gérées ;

- choisir des essences résistantes aux fortes chaleurs, à la répétition et l'intensité des périodes de sécheresse ;
- défendre la place des haies (lire aussi le volet agriculture) : protection contre le vent, valeur paysagère, hébergement d'auxiliaires... Attention à la compétition entre les arbres et les cultures en bordure des parcelles ;
- planter des essences d'arbres précieux pour le bois d'œuvre ;
- maintenir les forêts anciennes tout en favorisant le développement de jeunes peuplements plus résistants aux extrêmes climatiques ;
- favoriser la mise en place de zonages réglementaires en faveur de la protection des « vieux arbres » ;
- favoriser les îlots de sénescence ;
- restaurer les forêts dégradées ;
- assurer la régénération après exploitation forestière ;
- convertir les taillis en futaies et améliorer les accrus forestières²⁴ ;
- afforester²⁵ en limitant les changements d'affectation des sols ;
- limiter la mécanisation pour la gestion forestière ;
- 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)...

La gestion des espaces forestiers offre aussi une panoplie d'actions susceptibles de stocker et séquestrer le carbone dans les sols et la biomasse. Leur mise en application, avec une volonté collective, est parfaitement crédible.

Urbanisme

- maîtriser la consommation des espaces et favoriser la densification urbaine : réduire l'artificialisation des terres agricoles et forestières ;
- modifier les plans locaux urbanisme : développer les écoquartiers, privilégier les quartiers enherbés, buissonnants et arborés, créer des espaces verts collectifs, encourager les constructions en bois (bois local notamment), intégrer la lutte contre les îlots de chaleur urbains (végétalisation, maintien des cours d'eau...) ;
- développer les jardins partagés et l'agriculture urbaine ;
- sensibiliser les publics pour faire accepter les changements de pratiques et ainsi démultiplier les actions ;
- proposer des mesures incitatives et financières : isolation de l'habitat, transport, chauffage... ;
- proposer des solutions de climatisations naturelles ou de rafraîchissement de l'air ;
- favoriser les flux et les déplacements d'air dans les espaces urbains : structure urbaine permettant la circulation de l'air ;
- développement des énergies renouvelables : méthanisation, photovoltaïque, hydrogène...

Sachant que cette étude vise principalement le stockage et la séquestration du carbone dans les sols agricoles, les forêts et les produits bois, ces dernières recommandations sont à combiner aux mesures visant la réduction des émissions de GES dans les villes et les espaces urbanisés.

²⁴ Peuplement forestier obtenu par la colonisation naturelle d'un terrain dont l'utilisation précédente a été abandonnée (déprise des terres agricoles), définition CNPF.

²⁵ Concéder le droit prendre du bois dans une forêt.

Ces actions énumérées ont la capacité de mobiliser l'ensemble des 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. Ces actions non exhaustives entrent directement dans les politiques d'adaptation au changement climatique et d'atténuation des GES. Certaines pratiques sont plus efficaces que d'autres (favoriser les prairies permanentes 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. La séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers représente donc un puissant levier pour limiter les gaz à effet de serre dans l'atmosphère et par conséquent les impacts du changement climatique.

Favoriser le stockage et la séquestration revient à entrer dans une boucle vertueuse qui profite à tous : maintenir les forêts, préserver et valoriser des paysages méditerranéens, diminuer la pollution de l'air, éviter la dispersion de l'habitat, 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 permaculture²⁶, 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 de la transition énergétique et écologique est en réalité une approche systémique très positive qui interagit entre les secteurs économiques, sociaux et environnementaux.

Enfin, suite à cette étude et celle menée récemment à l'échelle de la métropole Aix-Marseille-Provence, un 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, la métropole Aix-Marseille-Provence et la CoVe 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.

²⁶ S'inspirer de la nature pour développer des systèmes agricoles.

Sources

Pellerin S. et al., 2019, *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?* Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p

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

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

CoVe (site officiel) : www.lacove.fr/mon-agglo/carte-didentite-de-la-cove/

Densités et formes urbaines, Illustrer et faciliter la mise en œuvre du SCoT BVA, Les publications de l'agence auRav, n°2, octobre 2012

Forum ouvert du 26 mars 2019, Mazan : *Face au changement climatique, bâtissons ensemble une agriculture d'avenir pour le Ventoux...*, Chambre d'Agriculture du Vaucluse, GDA Ventoux, SMAEMV, Inra, recueil des comptes rendus paru en avril 2019

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) :

ALDO - Niveau 1 (sols)	MOS 2001 - Niveau 1
Agriculture	224 - Plantes aromatiques
	240 - Zones agricoles hétérogènes
	299 - Terres arables et prairies
Prairie	320 - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
	330 - Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation
Forêt	310 - Forêts
Vergers	222 - Arboriculture autre qu'oliviers
	223 - Oliveraies
Vignobles	221 - Vignobles
Sols Artificiels Imperméabilisés	111 - Tissu urbain continu
	121 - Zones industrielles et commerciales
	122 - Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés
	131 - Activités extractives
Sols Artificiels enherbes arbustifs	112 - Tissu urbain discontinu
	142 - Équipements sportifs et de loisirs
	113 - Bâti diffus
	141 - Espaces ouverts urbains
Sols Artificiels arborés buissonnants	
Zones humides	410 - Zones humides intérieures
	420 - Eaux continentales

ALDO - Niveau 2	MOS 2001 - Niveau 2
Agriculture	224 - Plantes aromatiques
	240 - Zones agricoles hétérogènes
	299 - Terres arables et prairies
Prairies zones herbacées	330 - Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation
Prairies zones arbustives	320 - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
Prairies zones arborées	--
Forêt feuillus	--
Forêt mixtes	310 - Forêts
Forêt conifères	--
Vergers	222 - Arboriculture autre qu'oliviers
	223 - Oliveraies
Vignobles	221 - Vignobles
Sols Artificiels Imperméabilisés	111 - Tissu urbain continu
	121 - Zones industrielles et commerciales
	122 - Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés
	131 - Activités extractives
Sols Artificiels enherbés arbustifs	112 - Tissu urbain discontinu
	142 - Équipements sportifs et de loisirs
	113 - Bâti diffus
	141 - Espaces ouverts urbains
Sols Artificiels arborés buissonnants	
Zones humides	410 - Zones humides intérieures
	420 - Eaux continentales

Annexe 2

Évolution des surfaces entre 2001 et 2014 (en ha) à l'échelle de la CoVe :

		MOS 2014								
		prairies arbustives	prairies herbacées	forêt	vergers	vignes	cultures	zones humides	sols artificiels enherbés/ arbustifs	sols artificiels imperméabilisés
MOS 2001	prairies arbustives	-	5,5	792,4	13,8	55,7	75,5	0,6	55,4	30,5
	prairies herbacées	40,6	-	1,6				11,4	1,2	0,2
	forêt	107,5	1,7	-	2,3	9,3	10,5	0,6	14,1	3,9
	vergers	43,7		1,3	-		460,2	0,2	55,4	5,6
	vignes	13,5		0,7		-	1240	0,4	120,8	22,7
	cultures	244,3		7,3	259	1036	-	3,5	253,9	99,2
	zones humides	0,3	7,8	1,2	0,08	0,3	1,2	-	0,3	0,4
	sols artificiels enherbés/ arbustifs	10,6		17,5	3	12	5,7	0,6	-	25,8
	sols artificiels imperméabilisés	27,5	0,4	0,2	0,2	1,8	5,8	0,04	28,1	-

Annexe 3

Mutations de l'occupation des sols associées au scénario prospectif 1 :

Mutations (en ha)		Occupation des sols finale				
		sols artificiels arborés et buissonnants	sols artificiels arbustifs	sols artificiels imperméabilisés	prairies zones arborées	conifères
Occupation des sols initiale	sols artificiels arbustifs	140				
	sols artificiels arborés et buissonnants			40		
	cultures		60		260	
	vignes					300

Mutations (en % par rapport à la surface totale du type d'occupation des sols initiale)		Occupation des sols finale				
		sols artificiels arborés et buissonnants	sols artificiels arbustifs	sols artificiels imperméabilisés	prairies zones arborées	conifères
Occupation des sols initiale	sols artificiels arbustifs	6,56				
	sols artificiels arborés et buissonnants			1,74		
	cultures		0,94		4,06	
	vignes					2,67

Mutations de l'occupation des sols associées au scénario prospectif 2 :

Mutations (en ha)

		Occupation des sols finale					
		sols artificiels arbustifs	sols artificiels imperméabilisés	sols artificiels arborés et buissonnants	prairies zones arborées	prairies zones herbacées	forêts
Occupation des sols initiale	sols artificiels arbustifs			140			130
	sols artificiels arborés et buissonnants	20	30				
	cultures			50	120	60	
	prairies zones arbustives						50
	vignes			10	80		210

Mutations (en % par rapport à la surface totale du type d'occupation des sols initiale)

		Occupation des sols finale					
		sols artificiels arbustifs	sols artificiels imperméabilisés	sols artificiels arborés et buissonnants	prairies zones arborées	prairies zones herbacées	forêts
Occupation des sols initiale	sols artificiels arbustifs			6,56			6,09
	sols artificiels arborés et buissonnants	0,87	1,31				
	cultures			0,78	1,88	0,94	
	prairies zones arbustives						0,30
	vignes			0,09	0,71		1,87

Mutations de l'occupation des sols associées au scénario prospectif 3 :

Mutations (en ha)		Occupation des sols finale				
		sols artificiels arbustifs	sols artificiels arborés et buissonnants	sols artificiels imperméabilisés	forêts	prairies zones arborées
Occupation des sols initiale	prairies zones arbustives	50				
	sols artificiels arborés et buissonnants	50				
	cultures	300		50	100	
	sols artificiels arbustifs		110	40		
	vignes				100	300

Mutations (en % par rapport à la surface totale du type d'occupation des sols initiale)		Occupation des sols finale				
		sols artificiels arbustifs	sols artificiels arborés et buissonnants	sols artificiels imperméabilisés	forêts	prairies zones arborées
Occupation des sols initiale	prairies zones arbustives	0,30				
	sols artificiels arborés et buissonnants	2,18				
	cultures	4,69		0,78	1,56	
	sols artificiels arbustifs		5,15	1,87		
	vignes				0,89	2,67



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