# Les controverses de Mines Paris

# Compensation carbone par la reforestation : une bonne idée ?

Kadhem Ben Amor Vitor Carvalho Michel EID Gioovani Merlin

Clement Bouvier Raphael Dubourg Annabelle Lichou Felipe Tomazoni



Cette publication a été réalisée par des étudiants en troisième année du cycle ingénieur de Mines Paris PSL Research University. Il présente le travail réalisé dans le cours intitulé « Descriptions de controverse », qui a pour objectif d'introduire les étudiants à l'univers incertain de la recherche scientifique et technique et de les sensibiliser aux enjeux de la participation citoyenne.

Mines Paris décline toute responsabilité pour les erreurs et les imprécisions que peut contenir cet article. Vos réactions et commentaires sont bienvenus. Pour signaler une erreur, réagir à un contenu ou demander une modification, merci d'écrire à la responsable de l'enseignement : <a href="mailto:madeleine.akrich@mines-paristech.fr">madeleine.akrich@mines-paristech.fr</a>.

#### **■** Introduction

Ce début siècle est marqué par la prise de conscience massive d'une catastrophe climatique globale : le « réchauffement climatique ». Ce dernier est un phénomène mondial de changement climatique caractérisé par une augmentation générale des températures moyennes de la terre et un impact à long terme sur les équilibres météorologiques et les écosystèmes. Plus concrètement, en 2016, la température moyenne sur Terre était supérieure d'environ 1 à 1,5 degré aux températures moyennes de l'ère préindustrielle, ce qui représente une vitesse d'augmentation de la température terrestre sans précédent par rapport aux variations naturelles du climat du passé qui ont pu être estimées par les scientifiques.

Dans les années 60 le travail de plusieurs scientifiques a montré que le dioxyde de carbone (CO2) est un contributeur principal au réchauffement climatique et que l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère provoque une intensification de l'effet de serre et par conséquent un réchauffement de la surface terrestre. A la suite de cette découverte, de plus en plus de scientifiques et de politiques ont commencé à se pencher sur la question. C'est ainsi qu'en 1972, a lieu le premier sommet de la Terre. Pour la première fois, les préoccupations écologiques sont évoquées lors d'un sommet international.

Pendant la décennie qui suit, les données scientifiques se sont accumulées au point que, au milieu des années 80, les sept principales puissances économiques du monde (le G7) ont exhorté les Nations Unies à réunir un groupe de spécialistes pour étudier la question. Les organisations internationales ont reconnu le changement climatique comme une préoccupation publique spécifique et urgente.

En 2007, le quatrième rapport du GIEC établit avec une très forte probabilité qu'il y a un lien direct entre les activités anthropiques émettrices de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique. Si les gaz carbonés tels que le CO2 ou le méthane ne sont pas les seuls contributeurs à l'effet de serre, ils sont néanmoins considérés comme les principaux leviers du changement climatiques car ce sont ceux pour lesquels la concentration atmosphérique est fortement impactée par les activités anthropiques. L'homme, de par ses activités, telles que l'extraction et la combustion d'énergies fossiles, modifie les flux de carbone entre les différents réservoirs terrestres et entraine une augmentation de la quantité de carbone dans le réservoir atmosphérique, augmentant ainsi l'effet de serre.

L'humanité fait donc face à problème écologique majeur dont elle est la principale cause. Si nous voulons limiter les conséquences de ce réchauffement climatique nous devons "contrôler" la quantité de gaz à effet de serre. Cela passe non seulement par un arrêt des émissions qui vise à ne pas continuer à aggraver le phénomène mais également par la recherche de moyens de "recapturer" du carbone. C'est à dire de faire diminuer la quantité de carbone atmosphérique en le stockant dans d'autres réservoirs n'ayant pas d'impact sur l'effet de serre afin de compenser le "surplus" que nous avons émis dans l'atmosphère au cours du siècle dernier. L'objectif est ensuite de maintenir la quantité de gaz à effet de serre à un niveau stable, le fameux objectif "Net Zéro" : tout le carbone qui est émis dans l'atmosphère doit être recapturé afin d'obtenir un flux net nul de carbone vers le réservoir atmosphérique.

La solution parait simple mais est en réalité extrêmement complexe à mettre en œuvre. Le carbone atmosphérique, est relativement peu réactif et très difficile à capturer avec les technologies actuelles qui ne sont soit pas au point, soit beaucoup trop énergivores pour pouvoir être considérées comme solution durable. Un processus naturel et ancestral existe cependant : la photosynthèse. Ce processus est la chaine de réactions utilisée notamment par les plantes pour synthétiser leur matière organique à partir de CO2 puisé dans l'air. Lors de leur croissance (qui correspond à la production de matière organique), les végétaux capturent donc du CO2 atmosphérique, qui reste séquestré dans ce réservoir (dénommé biosphère) tant que le végétal n'est pas dégradé. Ce processus, permit grâce à l'énergie de photons lumineux, ne nécessite aucune intervention de la part de l'homme ce qui en fait une solution de stockage de carbone à la fois simple et peu couteuse.

Partant de cette constatation, se sont développés des projets de plantations d'arbres dont l'objectif est de stocker du carbone pour compenser nos émissions. Par exemple, si deux avocatiers stockent autant de carbone que ce qui est émis lors d'un vol Paris-Dubaï. Pourrions-nous utiliser cette solution pour compenser nos émissions ?

#### Législation de la compensation carbone

La compensation carbone, avant d'être inscrite dans la loi a été longuement débattue et réfléchie

Le protocole de Kyoto, adopté en décembre 1997 et ratifié en 2005, vise à limiter les émissions de six gaz à effet de serre (dont le CO2). Il a ouvert la voie au concept de compensation carbone en favorisant le financement de projets visant à absorber les émissions de gaz à effet de serre pour un montant égal aux émissions résiduelles d'une organisation, d'une entreprise ou d'un territoire. La compensation carbone se fera, par exemple, par le financement de plantations d'arbres qui absorbent le CO2 par photosynthèse, ou par la protection des forêts dans le monde.

Ce protocole a permis de mettre en place le système des marchés du carbone. Il existe deux systèmes de compensation des émissions de carbone : le premier, le marché règlementaire est lié au protocole de Kyoto et engage les signataires, et le second est un marché de compensations volontaires auquel chacun peut choisir de participer. Le principe du marché règlementaire est de donner droit aux Etats signataires (contraints par le protocole de Kyoto à la réduction de leurs émissions) à des émissions carbone (crédits carbone) en échange de financer des projets de réduction d'émission de gaz à effet de serre à l'étranger. Ces crédits sont des certificats garantis par l'ONU. Par contre le marché volontaire ne répond pas à une exigence règlementaire et est disponible à tous les acteurs qui souhaitent compenser leurs émissions. En outre, aucune organisation centrale ne régit le marché volontaire, et aucune certification officielle n'est imposée aux crédits carbones échangés dans ce cadre. Cela offre aux acteurs du marché une plus grande flexibilité, mais soulève également des inquiétudes quant à la fiabilité.

La conférence des parties (COP) est une conférence annuelle des nations pour fixer les objectifs climatiques mondiaux, au cours de laquelle les États s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. La seizième session de la COP tenue à Cancun du 29 novembre au 10 décembre 2010, est marquée par le développement du projet REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation). Le programme REDD+ comprend la mise en œuvre des mesures comme la réduction des émissions provenant du déboisement et de la dégradation des forêts, la gestion durable des forêts et la conservation et l'amélioration des stocks de carbone forestier. Ces actions sont désignées collectivement sous le nom de REDD+, qui devient désormais un élément essentiel des efforts mondiaux visant à atténuer les changements climatiques. Le plan cherche à s'attaquer aux causes de la déforestation et de la dégradation des forêts tout en offrant une voie pour augmenter les stocks de carbone forestier et parvenir à une gestion durable des forêts grâce à des mesures écologiques. La COP 16 stipule également le développement de mécanismes de suivi nationaux, complets et transparents pour les efforts d'atténuation déjà mentionnés.

Cinq ans après la COP 16, l'accord de Paris, adopté en décembre 2015 suite aux négociations de la COP21, cible l'objectif de la neutralité carbone, et encourage les pays à renforcer leurs capacités de séquestration, notamment par les forêts. Il exige en plus la présentation des comptes rendus des émissions de chaque pays et des efforts fournis pour atteindre les objectifs écologiques. En plus des réunions régulières seront organisées tous les 5 ans dans le but de faire "un bilan collectif".

Durant la même période la stratégie nationale bas carbone a été lancée. La stratégie nationale bas carbone, instaurée en 2015 par loi de transition énergétique pour la croissance verte, est un plan mis par la France afin d'atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050. La stratégie vise à mener la société Française vers une

transition énergétique indépendante des combustibles fossiles ce qui réduira les émissions de gaz à effet de serre.

Et très récemment en aout 2021, la ministre de la Transition écologique Barbara Pompili a relancé le label Bas carbone<sup>1</sup>. Un programme gouvernemental lancé en 2019 pour un label scientifique basé sur des initiatives visant la diminution des émissions ou bien l'établissement de puits de carbone, dans le but de compenser les émissions par le biais du reboisement et de projets agricoles spécifiques. Aussi en aout 2021 la Loi Climat et Résilience a été promulguée et publiée au Journal officiel le 24 août 2021. Elle « ancre l'écologie dans notre société : dans nos services publics, dans l'éducation de nos enfants, dans notre urbanisme, dans nos déplacements, dans nos modes de consommation, dans notre justice. »<sup>2</sup>. En particulier le chapitre IV (articles 142 à 147) traite les sujets de limiter les émissions du transport aérien, favoriser l'utilisation des trains surtout pour des voyages domestiques, et la compensation carbone obligatoire<sup>3</sup> de tous les vols domestiques d'ici 2024.<sup>4</sup>

Au cours des 25 dernières années, la compensation carbone est un sujet qui s'est développé du coté législatif, commençant par les accords internationaux et le protocole de Kyoto, passant ensuite par la promulgation de plusieurs lois et finissant par une tendance vers une compensation obligatoire des émissions carbone pour les années à venir.

#### Les sujets de controverses

Le chemin législatif déjà présenté montre la présence d'un consensus réglementaire visant un objectif méritant : la neutralité carbone atteinte par la compensation. Derrière cette compensation réside en fait l'achat de crédit carbone, un autre résultat du parcours législatif. L'achat de crédit carbone implique une participation financière à des projets visant à capter le CO2, et dès que l'on évoque le sujet de la « finance » ou de «l'achat » des crédits carbone, une multitude de critiques évoquent les sujets « d'acheter » du droit à polluer et du "greenwashing", et mettent en question la fiabilité des projets de compensation.

Plusieurs questions se posent au sujet de la compensation de compensation carbone :

Comment mesurer les stocks de carbone des forêts ? Et pourquoi est-il nécessaire d'avoir de telles mesures fiables ? Quels sont les essences d'arbres qui captent le plus carbone? Et où faut-il les planter pour obtenir la meilleure efficacité ? Et est-ce que l'âge des arbres affecte leur capacité à absorber le carbone ? Planter des cultures alimentaires ou des forêts pour la séquestration carbone ?

Notre étude sera orientée vers ces grandes interrogations que nous allons traiter en y apportant des éléments explicatifs et en les clarifiant grâce aux entretiens que nous avons effectués avec des personnes professionnelles engagées sur le sujet.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Certification climatique qui garantit que les projets de réduction ou séquestration du carbone réalisés sur le territoire national contribuent correctement et de manière transparente à atteindre les objectifs grâce à des méthodes crédibles et vérifiées de comptabilisation des émissions des gaz à effet de serre

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Loi climat et résilience: L'écologie dans nos vies. (2021, 20 juillet). *Ministère de la Transition écologique*. Repéré à https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience

<sup>3 50 %</sup> en 2022, 70 % en 2023, totalité de leurs émissions en 2024

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1) (2021-1104) (2021).

## ■ La mesure du stock de carbone : un processus complexe

La mesure du stock carbone est un processus complexe est c'est une opération coûteuse et longue. Ainsi pourquoi prendre la peine d'entamer un tel processus ?

D'une part pour observer de l'état actuel de la forêt. Les forets ont une fonction économique écologique, et s'assurer de la sante des forêts se reflète positivement sur le bien-être de l'homme.

D'autre part pour le suivi de la bonne exécution des projets de compensation. Comme vu précédemment, parfois les marchés de compensation carbone ne sont, ni soumis à une autorité ni à une certification. Qui pourra donc confirmer la bonne exécution des projets de compensation ? Pour être efficace, ce système doit cependant être contrôlé, et la guantité de carbone stockée déterminée avec précision.

#### La mesure du stock de carbone pour la conservation des forêts

La COP 16 a appuyé sur le rôle important de la mesure du stock de carbone non seulement pour le bien de la conservation des forêts dans leurs états actuels, mais aussi pour éviter leur dégradation, parce que lorsqu'elles sont dégradées, les forêts ont le potentiel de devenir des sources d'émissions de carbone ayant des conséquences nocives sur l'environnement. Selon une étude publiée le 29 avril 2021<sup>5</sup> qui analyse des mesures satellites de la quantité de carbone présente dans la biomasse, la forêt amazonienne a produit plus de CO2 qu'elle n'en a capté au cours des dix dernières années. Cela est dû à la déforestation extensive et à d'autres activités humaines affaiblissant la forêt tropicale.

"Nous avons constaté que la forêt amazonienne ne poussait plus", souligne Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche l'institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement de Bordeaux (INRAE), lors d'un entretien pour Euronews publié le 5 mai 2021<sup>6</sup>.

« Les stocks de carbone diminuent ce qui signifie que la forêt ne nous protège plus. Mais ce qui est encore pire, c'est que la forêt elle-même contribue à augmenter la concentration de CO2. Ainsi, l'Amazonie devient une source nette, plutôt qu'un puits de CO2. Il sera donc beaucoup plus difficile de lutter contre la crise climatique. »

Interrogé sur le même sujet, Xavier Morin, directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE) à Montpellier, indique que la transformation des forêts d'un puit en une source de carbone est un grand sujet d'actualité, en mettant en évidence que de la dégradation de l'état des arbres contribue également à cet effet.

« Il y a des débats actuels sur le fait que, par exemple, la forêt amazonienne pourrait devenir une source de carbone parce qu'on va se retrouver dans des conditions climatiques du fait de la déforestation et donc du fait qu'il y a une perte du climat régional qui est permis par la forêt elle-

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J.-P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., ... Moore, B. (2021). Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, *11*(5), 442-448. <a href="https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5">https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5</a>

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Dérèglement climatique : La forêt amazonienne, un puits de carbone en perdition. (2021, 4 mai). *Euronews*. Repéré à <a href="https://fr.euronews.com/2021/05/04/dereglement-climatique-la-foret-amazonienne-un-puits-de-carbone-en-perdition">https://fr.euronews.com/2021/05/04/dereglement-climatique-la-foret-amazonienne-un-puits-de-carbone-en-perdition</a>

même. Mais il y a des rétroactions qui font qu'on arrive à un changement de climat qui induit que la forêt souffre et a des formes de dépérissement et donc devient une source de carbone. »<sup>7</sup>

Ainsi à part la déforestation, qui s'est intensifiée ces dernières années, la forêt souffre de dégradations climatiques qui affaiblissent les arbres et réduit leurs efficacités d'absorption du carbone, sans pour autant les détruire.

« La dégradation des forêts (73 %) a contribué trois fois plus à la perte brute d'AGB (aboveground biomass) que la déforestation (27 %), étant donné que l'étendue de la dégradation dépasse celle de la déforestation. Cela indique que la dégradation des forêts est devenue le plus grand processus à l'origine de la perte de carbone et qu'elle devrait devenir une priorité politique plus importante. » <sup>8</sup>

Et cela souligne la nécessité de bien mesurer le stock de carbone dans la biomasse pour observer et entretenir les forêts et éviter leurs dégradations.

#### La mesure du stock de carbone pour le suivi des projets de compensation

Le changement climatique et les taux élevés d'émissions mondiales de carbone ont incité la mise en œuvre des projets de compensation surtout par reforestation. Pourtant pour que ce mécanisme soit efficace, il faut suivre son exécution et mesurer correctement la quantité de carbone stockée. D'où la nécessité de disposer des systèmes de surveillance de haute qualité pour évaluer la quantité de carbone présente dans les systèmes terrestres et son évolution dans le temps.

Lors d'un entretien pour la préparation de ce rapport, Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, assura que les mesures sont essentielles au contrôle de l'efficacité de la reforestation et nécessaires pour la planification préalable des projets de compensation.

« Dans ces questions de compensation, je pense qu'il y a une question clé, si on dit voilà avec tant d'hectares, je vais compenser tant de carbone [...], il faut être en mesure de calculer les stocks de carbone réellement produits par la forêt. Faire un bilan complet. Et ça, il faut des outils qui permettent de suivre la biomasse des forêts. Ces outils n'existent pas. On est en train de développer ces outils de suivi de la biomasse des forêts, mais ils n'existent pas, en tout cas dynamiques [...] Donc, tant que cet outil n'existe pas, l'histoire de compensation, c'est très vaque. »<sup>9</sup>

Et concernant le rôle des mesures de la biomasse carbone dans la gestion, la règlementation et le suivi de l'efficacité de la reforestation, il affirme qu'avoir des mesures va toujours dans le bon sens de l'amélioration parce que les mesures aident à quantifier les stocks de carbone présents. En outre, il ajoute que les mesures sont « indispensables » parce qu'elles constituent une preuve scientifique objective du résultat en termes de stocks de carbone dans la biomasse.

«Il y a beaucoup de forêts qui ont été plantées en Turquie et dans d'autres régions. Il y a des grands coups de publicité en replanter des millions d'hectares, mais un ans après, tout a été brûlé par la sécheresse. Donc, si vraiment on veut avoir des outils, si on veut mesurer, si on veut que les replantations aient un effet positif, il faut être en mesure de surveiller l'impact des replantations sur

-

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Entretien avec Xavier Morin, directeur de recherche au CNRS, le 16/12/2021

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J.-P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., ... Moore, B. (2021). Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, 11(5), 442-448. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5

 $<sup>^{\</sup>rm 9}$  Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

le stock de carbone. Et donc, il faut un outil. Sinon ça sera uniquement basé sur la confiance qu'on a sur les gens qui disent: "oui oui ça marche, on a estimé qu'on a plein de carbone en plus". Mais bon, tant qu'on n'est pas en mesure de le mesurer précisément, les choses n'évolueront pas avec. Ce genre d'outil est indispensable. »<sup>10</sup>

#### Méthodes de mesure

Si l'importance de la nécessité d'une mesure exacte des stocks de carbone est établie, la question des méthodes utilisées pour les évaluer ces stocks et leurs variations sera présenté. Les différentes méthodes de mesures présentent des questions de controverses entre elles sur le plan scientifique, concernant leur précision et la possibilité de généraliser leurs résultats sur une étendue géographique.

Selon une étude publiée en 2021<sup>11</sup>, on distingue 4 méthodes d'estimation de la biomasse des forêts :

Inventaires sur le terrain « in situ » :

Les inventaires in situ sont des mesures concrètes sur le terrain de différents paramètres des forêts (hauteur, diamètre moyen, densité...) qui seront introduits dans des modèles de calcul de la biomasse. Les avantages de cette approche sont sa précision et la couverture de la biomasse aérienne et souterraine. D'un autre côté, elle prend du temps, donne des résultats locaux et en plus n'est pas suffisamment appliquée pour couvrir le monde entier.

Xavier Morin, directeur de recherche au CNRS, explique l'histoire du développement de ces techniques.

« Historiquement, on a essayé d'estimer le carbone des forêts par des allométries. Par exemple, on calcule en fait une estimation du volume d'un arbre. Et puis, on mesure ce qu'on appelle la densité du bois et notamment le taux de carbone. Prenons par exemple une petite carotte de bois et on extrapole. Et celle qui permet d'estimer dans un tel arbre, il y a tant de carbone » 12

Et ajoute en expliquant le concept des tours à flux :

« Ce sont des tours où on mesure les échanges gazeux entre la forêt et l'atmosphère. Il n'y a pas que la forêt, ça peut être n'importe quel écosystème, mais il y en a notamment en forêt. Les échanges de CO2 entre la forêt et la biosphère et l'atmosphère, mais cette fois à l'échelle de l'écosystème, c'est à dire que ça permet vraiment de voir qu'est ce qui entre comme CO2, qui est stocké par l'écosystème et qu'est ce qui ressort par notamment la décomposition et la respiration. [...] Mais ça, c'était les outils qu'on avait évidemment avant une vingtaine d'années maintenant, on a des nouveaux outils. On commence à avoir des séries plus ou moins long terme qui permettent de vraiment quantifier combien de carbone stocke une forêt »

Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE de Bordeaux, complète en disant que les mesures sur site restent toujours nécessaires malgré l'utilisant d'autres techniques plus avancées :

« Dans tous les cas, il faut toujours faire des mesures in situ sur le terrain pour valider les méthodes » 13

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Ciais, P., & Wigneron, J.-P. (2021, 6 décembre). Rôle des forêts dans le bilan de carbone de la planète. *Planet-Vie.* Repéré à https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/role-des-forets-dans-le-bilan-de-carbone-de-la-planete

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Entretien avec Xavier Morin, directeur de recherche au CNRS, le 16/12/2021

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

#### Télédétection optique :

La télédétection optique est une méthode de télédétection par satellite qui consiste à envoyer des rayonnements électromagnétiques vers la zone forestière d'intérêt et ensuite à analyser le même rayonnement électromagnétique réfléchi afin d'en déduire les caractéristiques de la forêt. En effet l'onde électromagnétique interagit avec le bois de la forêt qui dépolarise l'onde électromagnétique, et cet effet est amplifié lorsque la forêt est densément boisée. Ces données sont utilisées dans des modèles de régressions statistiques ou Machine Learning, qui permettent d'estimer la biomasse et son évolution à l'échelle de la planète L'inconvénient de la télédétection optique est qu'au-delà d'un certain niveau de biomasse (environ 50 t/ha), les capteurs saturent et les estimations deviennent donc imprécises.

#### Télédétection lidar (Light Detection And Ranging):

La télédétection LIDAR est une méthode de télédétection semblable à la télédétection optique, mais qui utilise un spectre électromagnétique diffèrent. De façon analogue, le rayon réfléchi est analysé pour déterminer les paramètres qui permettent de calculer la biomasse comme par exemple la densité des arbres et leur hauteur individuelle. Cette approche a l'avantage de permettre des estimations extrêmement précises. Cependant, les mesures peuvent saturer et les estimations faites par LIDAR ne permettent pas de suivre évolution au cours du temps (mesures statiques), car il faut plusieurs années pour couvrir l'ensemble du globe par des mesures satellitaires.

« Enfin, il y a beaucoup d'autres méthodes avec des méthodes optiques et des méthodes de Lidar qui mesurent la hauteur des forêts. [...] Le problème de ces méthodes en général, c'est qu'elles saturent, c'est à dire lorsque la biomasse est très forte. Ces méthodes présentent des saturations au-delà de 80, 100 tonnes par hectare. » confirme Jean-Pierre Wigneron. 14

#### Télédétection micro-ondes :

Cette méthode s'appuie sur la mesure par satellite des émissions micro-ondes spontanées des surfaces terrestres. La mesure de l'atténuation, quantifiée par le paramètre VOD (Vegetation Optical Depth) est une forte indication de la quantité de biomasse présente. Par rapport aux autres méthodes, les mesures micro-ondes sont peu affectées par les conditions climatiques et tolèrent de grandes densités de végétation avant arriver au seuil de saturation des mesures.

Le projet Biomass Carbon Monitor pour le suivi de la biomasse des forêts est un produit du type télédétection par micro-ondes sur lequel notre interlocuteur Jean-Pierre Wigneron a travaillé. Les données du Biomass Carbon Monitor sont le résultat d'une récolte de mesures durant les 30 dernières années de l'émission micro-ondes des surfaces terrestres par le satellite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) de l'Agence spatiale européenne (ESA)

L'entreprise Kayrros qui commercialise, déclare que Biomass Carbon Monitor est

« la première plateforme géospatiale capable de mesurer le rôle des forêts dans la séquestration carbone par l'observation des changements de la biomasse. [...] Le Biomass Carbon Monitor permet d'accéder librement à des cartes mondiales de changement des stocks de carbone contenus dans la biomasse aérienne. Les données permettent de quantifier les changements

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

annuels de la biomasse et de déterminer le rôle que jouent les forêts dans la réduction de la quantité de carbone présent dans l'atmosphère. »<sup>15</sup>

Pour Philippe Ciais, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) qui est un partenaire dans le développement de ce produit :

« C'est un outil révolutionnaire qui complète les inventaires et les observations spatiales déjà disponibles en apportant une information complète sur la manière dont le carbone stocké par la biomasse évolue au cours du temps » 16

#### Interrogé sur les atouts de cet outil, Jean-Pierre Wigneron considère que :

« L'avantage de SMOS, c'est qu'il ne sature pas même pour de la biomasse très élevée. L'inconvénient de SMOS que ce sont des échelles très larges de l'ordre de 25 km par 25 km. Donc, ce sont plutôt des suivis continentaux, »<sup>17</sup>

#### En résumé

Dans toutes ces techniques, il y a encore de grandes incertitudes dans l'estimation de la quantité de carbone du fait de la présence dans chacune des méthodes d'un compromis entre la précision et la résolution spatiale.

Laquelle de ces méthodes est préférée ? Et quelle résolution de mesure sera suffisante ?

Sur la question concernant les erreurs de mesure, Jean-Pierre Wigneron indique que les erreurs sont inévitables que ce soit avec la télédétection micro-ondes ou avec d'autres méthodes parce que les perturbations pendant les mesures sont incontrôlables.

« Notre modèle n'est pas parfait, loin de là. C'est un modèle approché bien entendu, il y a des erreurs dans la modulation. Il y a des erreurs dans les observations aussi, par exemple en particulier des interférences micro-ondes, qui polluent les mesures micro-ondes. Ça on est très sensible dans les micro-ondes passives, un peu moins dans le domaine radar. Mais il y a des pollutions du signal, donc des interférences de micro-ondes qui polluent dans les micro-ondes. En optique, il y a d'autres problèmes. Il y a l'atmosphère qui pollue le signal, les nuages, par exemple. Ça masque totalement les observations. Donc, au niveau des observations, il y a des erreurs, bien entendu des incertitudes au niveau de nos méthodes et des incertitudes aussi sur les mesures et sur les simplifications qu'on a faites dans nos modèles. »<sup>18</sup>

Parlant ensuite de la résolution nécessaire pour estimer un stock de carbone, Jean-Pierre Wigneron répond que la réponse n'est jamais évidente, pourtant avec les travaux de recherches continues, les méthodes de détection emploieront des résolutions de plus en plus fines.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Kayrros. (2021, 29 octobre). Communiqué de presse suite au lancement du produit Biomass Carbon Monitor le 29 octobre 2021. Repéré à https://www.kayrros.com/wp-content/uploads/2021/10/COMMUNIQUE-DE-PRESSE-29102021-Biomass-Carbon-Monitor.pdf

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Cartographie par satellite des changements dans la séquestration du carbone forestier. (2021, 29 octobre). *INRAE Institutionnel*. Repéré à https://www.inrae.fr/actualites/cartographie-satellite-changements-sequestration-du-carbone-forestier

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

« Question pas facile, meilleure est la résolution spatiale, bien entendu, mieux c'est. Estimer la biomasse d'un arbre, c'est très, très difficile à faire. C'est un compromis entre avoir une très bonne résolution spatiale et avoir une très bonne précision. »<sup>19</sup>

Malgré le fait que les méthodes optique et Lidar peuvent donner des résolutions de l'ordre du mètre il y a une saturation intrinsèque qui nait du fait de l'utilisation de ces méthodes. Et en parlant de la télédétection par micro-ondes le chercheur de l'INRAE était optimiste.

« Donc nous, on travaille à essayer de lever cette saturation qui naît des méthodes d'optique [...] Mais il est possible que dans quelques années, on ait des produits à des résolutions de l'ordre de 10 mètres. Effectivement, on estime que les méthodes seraient beaucoup plus précises. »

### ■ Planter une forêt qui stocke du carbone efficacement

Après avoir choisi un projet de reforestation qui respecte les conditions du protocole de Kyoto, il est nécessaire de prêter attention aux différents types de forêts qui existent et examiner leurs quantités de carbone stockées respectives mesurées par les diverses méthodes présentées précédemment. On peut alors se demander où planter, sous quelles latitudes et dans quel milieu climatique ? Mais également, quoi planter, quelles essences et en mono- ou pluri-culture ? Le tout pour favoriser le stockage du carbone

#### Les différents facteurs qui influencent le stockage en carbone d'une forêt

Le reboisement est envisagé en prenant compte que les réservoirs de carbone terrestre ont été fortement réduit, par exemple, la végétation actuelle de l'Autriche ne contient que 36% de la quantité de carbone que ce que l'on pourrait attendre d'une végétation naturelle, les principales causes de cette réduction (77%) sont les activités humaines telles que la conversion des forêts en terres agricoles et en zones urbaines<sup>20</sup>.

Le boisement d'anciennes terres agricoles augmente le réservoir de carbone dans la biomasse aérienne et reconstitue le réservoir de carbone du sol<sup>21</sup>, mais l'intensité de cette augmentation est directement influencée par différents facteurs, tels que :

- Dans les forêts boréales de tourbières, l'excès d'humidité du sol est un facteur limitant.
- Dans les forêts de haute altitude et les forêts boréales, la courte saison de croissance limite le taux de décomposition annuel, tandis que dans les systèmes méditerranéens, les sécheresses estivales inhibent le renouvellement de la MOS.
- L'utilisation antérieure des terres affecte le potentiel de séquestration du carbone des sites boisés. Les sols de pâturage ont déjà des stocks élevés de carbone et des densités élevées de racines dans la partie supérieure du sol minéral, de sorte que le boisement a un faible effet.
- La profondeur d'enracinement est importante pour le carbone du sol car la croissance des racines est le moyen le plus efficace d'introduire du carbone dans le sol.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Erb, K.-H. (2004). Land use-related Changes in Aboveground Carbon Stocks of Austria's Terrestrial Ecosystems. Ecosystems, 7(5). https://doi.org/10.1007/s10021-004-0234-4

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., ... Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma, 137(3-4), 253-268. <a href="https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003">https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003</a>

L'efficacité du stockage de carbone dépend donc de nombreux facteurs, tels que la position sur le globe, l'aridité de la région, le cycle de l'eau, la socio-économie de la région et même le type d'arbre planté. Nous nous consacrons dans la suite à deux facteurs majeurs : les essences des arbres et les milieux climatiques.

#### Influence des essences d'arbres plantées

Les différentes espèces d'arbres influencent directement le stockage de carbone comme indiqué dans le tableau ci-dessous, la première colonne indique la concentration de carbone dans le bois des arbres, la deuxième la moyenne de carbone par hectare (cela prend en compte l'espace entre les arbres), la troisième le carbone stocké dans le sol et la dernière la somme.

Wood density of European tree species and median of C pools in European forests (de Vries et al., 2003)

Species	Wood density [kg/m³]	Tree C [t/ha]	Soil C [t/ha]	∑C [t/ha]
Pinus sylvestris (Scots pine)	490	60	62	122
Picea abies (Norway spruce)	430	74	140	214
Abies alba (Silver fir)	410	100	128	228
Fagus sylvatica (beech)	680	119	147	266
Quercus sp. (oak)	660	83	102	185

Stockage de carbone par type d'arbre.

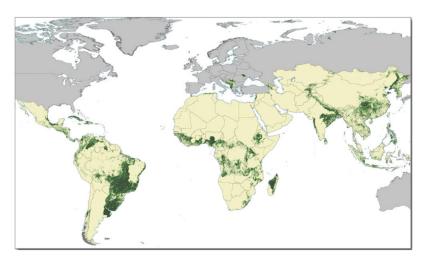
En toute logique, le meilleur arbre pour le stockage du carbone serait le *Fagus sylvatica*, en raison de sa forte teneur de carbone élevé. Cependant, il n'est pas possible de choisir simplement l'arbre qui stocke le plus de carbone pour le reboisement, car elles dépendent de conditions de sol et de climat spécifiques, et ces conditions climatiques influencent aussi directement le stockage total.

#### Influence du milieu climatique de la forêt

En respectant les conditions du protocole de Kyoto, plus précisément le MDP-AR et en éliminant d'autres zones inadaptées à la reforestation telles que les zones urbaines, les zones arides, les zones classées comme toundra, les chercheurs<sup>22</sup> sont arrivés à la carte suivante des zones théoriquement possibles pour la reforestation :

<sup>22</sup> Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., ... Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma, 137(3-4), 253-268. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003

\_



Carte des terres adaptées au MDP-AR (vert foncé), telles que délimitées par l'analyse de l'adéquation des terres.

Même en tenant compte de nombreuses conditions différentes, une telle carte ne sert qu'à donner une vue d'ensemble des régions possibles, car des problèmes physiques qui ne sont pas liés aux restrictions du MDP-AR affectent fortement l'efficacité de la reforestation. Bien que le piégeage du carbone dans les forêts soit bénéfique pour le climat, les forêts affectent les propriétés biophysiques de la surface terrestre, telles que la réflectivité de la lumière solaire (albédo) et l'évaporation, avec d'autres implications pour le forçage radiatif du climat<sup>23</sup> (la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné). Les modèles climatiques suggèrent que les grands programmes de reboisement dans les régions boréales auraient des avantages climatiques limités en raison de la substitution des zones claires dominées par la neige par une couverture forestière sombre<sup>24</sup>, parce que les couleurs sombres absorbent la lumière et la transforment en chaleur, alors que les couleurs claires la renvoient.

À l'inverse, les avantages climatiques de la reforestation dans les tropiques sont renforcés par des changements biophysiques positifs tels que la formation de nuages, qui reflètent davantage la lumière du soleil. Ces modèles de forçage radiatif total renforcent l'important potentiel d'atténuation du climat des tropiques, découragent les grands changements d'utilisation des terres dans les régions boréales et suggèrent que les grands changements d'albédo dans les régions tempérées devraient être évités pour maximiser les avantages climatiques de la séquestration du carbone.

En tenant compte de toutes ces conditions et en se concentrant alors sur une région spécifique, certains projets tels que l'Initiative pour la restauration des paysages forestiers africains (AFR100), dans le cadre de laquelle l'Allemagne et la Banque mondiale ont investi 1,4 milliard de dollars auprès des gouvernements africains pour planter 100 Mha de RPF d'ici 2030 ont été mis en œuvre. D'autres projets, qui ne s'appuient pas tant sur toutes ces recherches scientifiques, se concentrent plutôt sur la plantation d'arbres presque partout sur le globe, comme la campagne "Trillion Tree" de Plant for the Planet (ONG soutenue par l'ONU), qui vise à planter 1 billion d'arbres (13,8 milliards d'arbres ont été plantés d'ici mai 2020). Le projet suppose qu'un billion d'arbres

-

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Canadell, J. G., & Raupach, M. R. (2008). Managing Forests for Climate Change Mitigation. Science, 320(5882), 1456-1457. https://doi.org/10.1126/science.1155458

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Canadell, J. G., & Raupach, M. R. (2008). Managing Forests for Climate Change Mitigation. Science, 320(5882), 1456-1457. https://doi.org/10.1126/science.1155458

compensera 25 à 33 % des émissions anthropiques de CO2 produites jusqu'à présent. Des déclarations générales sont utilisées, telles que "les forêts sont les poumons du monde".<sup>25</sup>

# ■ Enjeux et problématiques de la localisation du projet de reforestation

Un projet de reforestation donné dans un milieu climatique donné n'est pas nécessairement le choix le plus judicieux en ce qui concerne l'efficacité de stockage en carbone. En effet limiter la reforestation pourrait être plus efficace dans un nombre majoritaire de pays. Également, on imagine que planter une forêt peut se faire sur des terres arables et au détriment de cultures nourricières, ce qui pose un problème éthique surtout dans les pays en voie de développement.

#### Reforester ou limiter la déforestation : une affaire de pays et de milieu climatique

Quelle méthode est la plus efficace ? Dans quels pays ? Pourquoi ?

La viabilité de la reforestation est particulièrement discutable lorsqu'on la compare avec une autre solution évidente : la limitation de la déforestation. Ceci s'identifie à une mesure de contention plutôt qu'une intervention directe ; le contraste entre ces deux solutions caractérise une claire problématisation de l'efficacité du stockage de carbone par des arbres et, par conséquent, s'agit d'un facteur décisif dans les actions environnementales de différents pays.

Dans un entretien avec Jonah Busch, économiste de l'environnement et PhD de l'Université de Californie Santa Barbara, il explique :

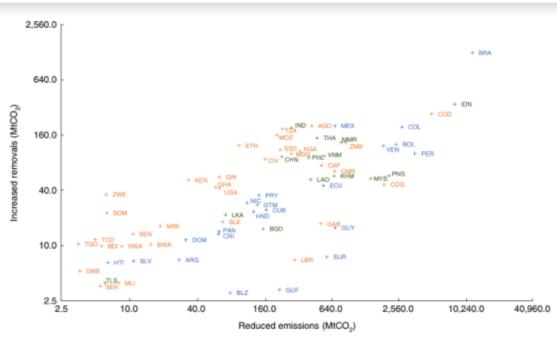
"Il n'est pas raisonnable de limiter nos options ou de ne privilégier qu'une solution parmi plusieurs — il n'y a aucune raison, d'un point de vue environnemental, de considérer qu'une seule mesure doit être exclusivement prise parce qu'elle est plus rentable. "26"

Selon lui, dans des circonstances idéales, la fermeture des centrales au charbon serait potentiellement l'intervention la plus efficace possible au regard des émissions de GES, et en ce qui concerne les forêts, la meilleure chose à faire est de les protéger, d'éviter la déforestation tout d'abord. Mais de tels scénarios ne sont pas très réalistes.

Ces deux scénarios produisent des résultats différents selon l'endroit où elles sont appliquées. Ceci fait allusion au sujet exposé précédemment concernant les types de végétation et leur effet dans les différentes régions de la planète. On en déduit que la reforestation et la limitation de la déforestation sont deux mesures indispensables qui doivent être prises ensemble — en tenant compte de la manière dont chacune d'entre elles répond économiquement et socialement dans différents territoires.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Trillion Trees. (n.d.). Repéré à https://trilliontrees.org/why-forests

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Entretien avec M. Jonah Busch, PhD Université de Californie Santa Barbara, 5 novembre 2021.



Rapport de la réduction des émissions de carbone et de l'augmentation du stockage pour de différents pays.27

Ce nuage de points permet de visualiser le statut de différents pays en ce qui concerne la tendance d'exploitation de la reforestation; tandis que l'axe vertical indique l'abattement de carbone à travers de la reforestation, l'axe horizontal fait rapport à la simple réduction des émissions (et, par conséquent, montre une relation avec la préservation des forêts plutôt que de leur compensation par reforestation). Pour de plusieurs pays africains (en orange), il est donc plus intéressant économiquement de planter plus d'arbres, alors que pour des pays tropicaux américains (en vert), c'est la préservation des forêts existantes le plus efficace. L'un des principaux motifs est aussi le plus intuitif : selon les indexes de 2018 de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO–UN), le Togo et la Somalie (très à gauche dans le nuage de points) ont respectivement un ratio de 10,0% et 4,9% d'aire forestière, alors que le Brésil et le Pérou (très à droite) présentent 55,4% et 61,8%, par exemple.<sup>28</sup>

Alors, il devient évident que la décision de faire de la reforestation doit prendre en compte aussi la viabilité géographique de chaque pays. Néanmoins, ce n'est pas, bien entendu, le seul facteur déterminant.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Busch, J., Engelmann, J., Cook-Patton, S. C., Griscom, B. W., Kroeger, T., Possingham, H., & Shyamsundar, P. (2019). Potential for low-cost carbon dioxide removal through tropical reforestation. Nature Climate Change, 9(6), 463–466. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0485-x

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Rapports FAO-UN index of deforestation: https://rainforests.mongabay.com/deforestation/2000/?C=M;O=A

#### Enjeux et problématiques de la reforestation sur des terres arables

L'utilisation massive de la reforestation comme compensation carbone nécessite de transformer des paysages cultivables en forêt. Plusieurs organisations non gouvernementales, notamment Oxfam, dénoncent la compétition qui en résulte entre l'utilisation des terres à des fins agricoles, et son utilisation à des fins de compensation carbone. Étant donnée la variété d'arbres utilisés pour la compensation, arbres à croissance rapide et qui ne sont pas utilisés comme ressource alimentaire, une utilisation trop grande de la reforestation est présentée comme une menace directe pour l'approvisionnement en nourriture.

Si la plantation d'arbre est en théorie possible sur des surfaces répertoriée, la plupart de ces zones ne peuvent en réalité pas être utilisées pour le reboisement. Par exemple, plus de 52% (172 Mha) des terres d'Amérique du Sud identifiées comme appropriées sont classées comme terres cultivées et 29 millions d'hectares supplémentaires sont constitués d'un mélange d'arbustes et de prairies et sont susceptibles d'être soumis à une certaine forme d'élevage, c'est-à-dire, ne peuvent pas être remplacées par de la forêt parce qu'elles mettent en danger la production alimentaire locale et, dans le cas de plantations saines, le reboisement n'introduit pas de puits de carbone positif significatif.

Oxfam a donc publié un rapport détaillé en août 2021 qui met en évidence le caractère non durable de la compensation, et prend position pour une redéfinition des objectifs zéro émissions non comme « émissions nettes » mais comme « émissions réelles »<sup>29</sup>. Selon l'ONG, il est question d'un risque d'augmentation de 80% du prix des denrées alimentaires dans les zones les plus touchées.

Ce rapport apporte une argumentation chiffrée s'appuyant sur une étude réalisée par Oxfam pour appuyer son propos. Il serait question de près de 1,6 milliards d'hectares de forêts plantées nécessaires pour effectuer la compensation des émissions d'ici 2050, soit cinq fois la taille de l'Inde, et à peu près la surface actuellement utilisée pour l'agriculture dans le monde.

Les problématiques liées à la compétition entre reforestation et agriculture, surtout vivrière, ont été évoquées durant la COP26 à Glasgow. Le CCFD (comité catholique contre la faim et pour le développement) Terre Solidaire s'est rallié aux conclusions d'Oxfam et a demandé aux gouvernements présents de décourager au maximum l'utilisation de la reforestation comme puit de carbone. Sans engagement précis sur ce point, il est encore trop tôt pour observer une inflexion dans les politiques gouvernementales.

Plusieurs projets de compensation par la plantation ont été décriés. En particulier le pétrolier Total qui a publié un rapport portant sur un projet de planter 40 000 hectares de forêts sur le plateau de Batéké en République du Congo. Myrto Tilianaki, de CCFD Terre solidaire, s'est prononcé au nom de l'ONG pour dénoncer l'opération<sup>30</sup>.

« Nous avons parlé avec un allié sur place qui nous a informé qu'il s'agit d'un écosystème extrêmement riche et complexe, et qu'il y a des populations qui dépendent de ces terres et dont l'habitat serait impacté par la destruction de cette savane sur le plateau de Batéké, et il nous a également informé que les populations locales n'ont pas été à ce jour consultées pour la mise en place de ce projet, et l'autre point c'est le danger pour la biodiversité car Total va planter des acacias donc des monocultures à croissance rapide, qui sont non natives à la région, et qui non seulement ont un faible potentiel de séquestration de carbone mais également consomme de grande quantité d'eau. »

-

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Sen, Aditi, et Nafkote Dabi. « Tightening the Net: Net zero climate targets – implications for land and food equity ». Oxfam, 3 août 2021. https://doi.org/10.21201/2021.7796.

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> « « Compensation carbone : tout sauf neutre ! » - Le rapport qui analyse et (...) - CCFD-Terre Solidaire ». Consulté le 10 janvier 2022. https://ccfd-terresolidaire.org/nos-publications/nos-communiques-de/compensation-carbone-7131.

En plus de l'habitat, il apparait une opposition entre la protection de la biodiversité et la compensation carbone. L'ONG dénonce une analyse trop simpliste des effets de la reforestation (ou une volonté de laisser cette analyse volontairement simpliste de la part des grands groupes en question) qui consiste à ne considérer que seule la problématique des émissions carbone valent le coup d'être prise en compte.

Total, de son coté, assure procéder en prenant en compte les problématiques locales, sans toutefois y accorder beaucoup d'importance dans son rapport détaillé. L'entreprise affirme :

« [On] part du principe qu'on ne peut développer des puits naturels de carbone pérennes que si cela s'accompagne d'une chaine de valeur locale pérenne, que cette dernière soit agricole ou forestière. Cette démarche permet d'intégrer pleinement les enjeux territoriaux liés à la gestion des puits de carbone. »

D'autre part, ce rapport d'Oxfam<sup>31</sup> dénonce la contradiction entre la déforestation qui a pour objectif d'augmenter la surface de terres arables et la reforestation sur d'anciennes terres cultivées. L'équation amène à une compensation des deux phénomènes, d'une grande perte de biodiversité, et d'un injustifiable gâchis d'énergie.

Pour Nicolas Vercken, Directeur campagnes et plaidoyer à Oxfam France :

« Les terres sont centrales dans la lutte contre la crise climatique et la faim. L'agriculture industrielle, la déforestation et la multiplication des chocs météorologiques détruisent les terres, dont nous dépendons pour notre alimentation, et les populations les plus pauvres du monde sont les plus durement touchées.

Les États doivent investir davantage dans l'agriculture familiale, en particulier en faveur des femmes agricultrices, qui souffrent le plus de la faim et sont les grandes laissées pour compte des politiques agricoles. Ils doivent également défendre les droits des peuples à leurs terres et à leurs forêts, afin que les communautés vulnérables puissent se nourrir aujourd'hui et dans le futur.

Le but des politiques doit être double : éradiquer la faim et atteindre zéro émission. Ils doivent rejeter les fausses solutions qui détournent la terre de la production alimentaire au profit de cultures destinées à la production d'énergie et à la capture de carbone. »

Néanmoins, des régulations sur les marchés des terres cultivables pourraient, selon cette ONG permettre une utilisation plus raisonnée de la reforestation. Le but étant d'empêcher une flambée de la demande en terre et une aggravation des inégalité foncières.

La conclusion du rapport met en relation les problématiques de faim et d'émissions de gaz à effet de serre avec le slogan : « zéro faim, zéro émissions »

\_

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> « Reforestation hopes threaten global food security, Oxfam warns | Carbon offsetting | The Guardian ». Consulté le 10 janvier 2022. https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/03/reforestation-hopes-threaten-global-food-security-oxfam-warns.

### ■ Longévité et gestion des forêts : la reforestation à quel prix ?

Une fois le projet de reforestation engagé et certifié par le protocole de Kyoto, se pose la question de la gestion et de l'exploitation de la forêt. La première question est de savoir si une forêt qui vieillit, continue à avoir un intérêt du point de vue du stockage en carbone ? S'il faut la remplacer et reforester du point de vue de la compensation carbone ? Également se pose la question des coûts environnementaux associés à l'exploitation forestière sur le bilan carbone ? La seconde question s'intéresse à la gestion en elle-même de la forêt. La partie qui suit tentera de répondre à ces questions.

#### A quel âge une forêt stocke-t-elle le plus de carbone?

Il s'agit d'un sujet de controverse encore présent dans le débat scientifique comme nous le rappelle J. Busch, économiste de l'environnement dans une ONG :

"D'après ce que je comprends, c'est une sorte de question scientifique ouverte. [...] Les vieux arbres ne grandissent pas en hauteur, mais ils grossissent dans une forêt. Il est de plus en plus difficile de mesurer ce phénomène, car les mesures sont entachées de parasites, certains arbres meurent, d'autres poussent, il y a ce que l'on appelle la fertilisation par le dioxyde de carbone, c'est-à-dire que nous ajoutons du CO2 dans l'atmosphère et qu'une partie de ce CO2 est absorbée par la végétation. Il est donc probable que le phénomène ne s'arrête jamais, mais je pense qu'il y a encore beaucoup de travail scientifique à faire pour essayer de comprendre ce qui se passe exactement."

En 2014, une étude publiée dans Nature<sup>32</sup> par une équipe une équipe internationale de chercheurs dirigée par Nathan Stephenson, un écologiste forestier du United States Geographical Survey, a révélé que le taux de croissance d'un arbre typique augmente tout au long de sa vie. Stephenson et son équipe ont compilé les mesures de croissance de plus de 600 000 arbres appartenant à plus de 400 essences d'arbres des régions tropicales, subtropicales et tempérées de six continents. Ils ont constaté que le taux de croissance de la plupart des essences augmentait continuellement à mesure qu'elles vieillissaient.

"Cette découverte contredit l'hypothèse habituelle selon laquelle la croissance des arbres finit par décliner à mesure qu'ils vieillissent et deviennent plus gros. [...] Cela signifie également que les grands et vieux arbres absorbent mieux le carbone de l'atmosphère qu'on ne l'a généralement supposé", explique Stephenson.

Une étude publiée dans PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences - en 2019<sup>33</sup> par Thomas Pugh de l'Institut de recherche forestière de Birmingham au Royaume-Uni a révélé que les jeunes forêts séquestrent plus de carbone par an que les forêts anciennes. Ces résultats bouleversent les idées préconçues selon lesquelles les forêts tropicales anciennes sont les plus grands puits de carbone de la planète, indique l'étude de Pugh. Elle définit les forêts anciennes comme tout peuplement âgé de plus de 140 ans.

On pourrait croire que les deux études se contredisent. Mais les deux scientifiques affirment qu'elles sont cohérentes dans un échange de messages publics<sup>34</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup>.« Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size | Nature». Consulté le 5 janvier 2022. https://www.nature.com/articles/nature12914.

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Forest Regrowth in Global Carbon Sink Dynamics ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, no 10 (5 mars 2019): 438287. https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116.

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup>.Mongabay Environmental News. « Tall and Old or Dense and Young: Which Kind of Forest Is Better for the Climate? », 23 mai 2019. https://news.mongabay.com/2019/05/tall-and-old-or-dense-and-young-which-kind-of-forest-is-better-for-the-climate/.

"La différence est que Stephenson et al. ont étudié la biomasse d'arbres individuels, alors que notre étude porte sur la biomasse de peuplements entiers d'arbres. [...] Alors qu'un arbre isolé peut continuer à accumuler de plus en plus de biomasse, il y aura moins de tels arbres dans un peuplement, simplement en raison de leur taille et, à mesure que les peuplements d'arbres vieillissent, des lacunes ont tendance à apparaître en raison de la mortalité des arbres. [...] Donc, notre conclusion est en fait que les jeunes forêts sont responsables d'une plus grande partie du puits de carbone terrestre que les forêts anciennes", a déclaré Pugh.

"Les deux choses sont vraies. [...] Le taux de croissance de la masse individuelle des arbres augmente avec leur taille, mais les vieilles forêts absorbent généralement le carbone plus lentement que les jeunes forêts", a répondu Stephenson.

#### Exploitation forestière et reforestation, quels effets sur le bilan carbone ?

En considérant comme Stephenson que les jeunes forêts tendent à absorber plus rapidement le carbone, on peut se demander si le bilan de carbone stockée par la plantation d'une forêt sur une terre donnée peut être amélioré en renouvelant la forêt qui s'y trouve, et en exploitant son bois.

Selon Dominick DellaSala<sup>35</sup>, directeur de l'Institut GEOS et membre du groupe de travail sur le carbone forestier de la Commission sur le réchauffement climatique de l'Oregon, une bûche perd environ 70 % de son carbone lorsqu'elle devient un bureau ou une table. Environ 45% du carbone reste sur le sol de la forêt, cela comprend la décomposition des mottes de racines, des branches et des cimes qui restent sur place et un peu de carbone du sol. Environ 25% est perdu pendant la fabrication. Et lorsque les produits finis en bois se dégradent avec le temps, les émissions sont encore plus importantes.

Et cela n'inclut pas le carbone émis par les tronçonneuses, les camions forestiers et les tours. En 2018, Law a dirigé une équipe de chercheurs qui a quantifié ces émissions de carbone et toutes les autres émissions de carbone lorsque les grumes passent de la forêt à la scierie. Leur article, publié dans PNAS<sup>36</sup>, indique que les opérations d'exploitation forestière en Oregon contribuent en moyenne à plus de 30 millions de tonnes de CO2 dans l'air. Cela équivaut à presque autant que la centrale au charbon la plus polluante du monde, la centrale au charbon de Taichung à Taïwan, qui émet environ 36 millions de tonnes par an.

En outre, l'impact de l'exploitation forestière sur le climat est encore plus important si l'on tient compte des possibilités de croissance futures perdues pour une grume abattue, explique Mme Law. Bien que son article ne tente pas de quantifier le potentiel d'atténuation du climat auquel renonce un arbre abattu, elle reconnaît qu'il pourrait être important.

Mme Law a appelé l'industrie à contribuer à l'atténuation du changement climatique en doublant les rotations de récolte à 80 ans et a exhorté les agences gouvernementales gérant les forêts à imposer leurs propres restrictions de récolte. Ces actions, ainsi que d'autres, pourraient augmenter la quantité de carbone absorbée par les forêts de l'Oregon de 56 % d'ici 2100, et améliorer la qualité de l'eau et la biodiversité, selon son article. Elle mène actuellement une analyse similaire pour les forêts de Californie et de Washington.

Même après la transformation du bois en un produit, le carbone retournera probablement dans l'atmosphère plus tôt qu'on ne le pense, a déclaré Mme Law. Les arbres anciens des forêts tropicales peuvent séquestrer le

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup>.Mongabay Environmental News. « Tall and Old or Dense and Young: Which Kind of Forest Is Better for the Climate? », 23 mai 2019. https://news.mongabay.com/2019/05/tall-and-old-or-dense-and-young-which-kind-of-forest-is-better-for-the-climate/.

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup>.Law, Beverly E., Tara W. Hudiburg, Logan T. Berner, Jeffrey J. Kent, Polly C. Buotte, et Mark E. Harmon. « Land Use Strategies to Mitigate Climate Change in Carbon Dense Temperate Forests ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, n<sup>0</sup> 14 (3 avril 2018): 3663-68. https://doi.org/10.1073/pnas.1720064115.

carbone pendant des centaines d'années, ce qui est beaucoup plus long que ce que l'on attend des bâtiments qui sont généralement censés survivre à leur utilité ou être remplacés en quelques décennies.

# ■ La gestion forestière durable contre le greenwashing et l'exploitation intensive

Toujours dans l'idée que l'exploitation forestière et le renouvellement des forêts tous les 80 ans, pour citer Mme Law, diminue les quantités de carbone stockées au fil du temps d'une zone boisée. La gestion forestière durable serait un moyen nécessaire pour augmenter les capacités de stockage en carbone des forêts actuelles. Une gestion durable plutôt qu'une reforestation cyclique.

Cette gestion durable est d'autant plus nécessaire au regard du fait que la longévité et la pérennité des forêts se retrouvent mises en danger par le réchauffement climatique, avec pour conséquence que les forêts tropicales stockent de moins en moins.

Les forêts tropicales africaines et amazoniennes saturent et absorbent de moins en moins de carbone selon une étude scientifique publiée dans le magazine Nature et relayée sur France Culture<sup>37</sup>. Le pourcentage des émissions absorbées par les forêts tropicales a ainsi été divisé par trois depuis les années 1990. Cette étude réalisée pendant 30 ans, s'est appuyée sur le suivi du diamètre de 300 000 arbres, permettant d'estimer les quantités de carbone stockées. Ils ont ainsi pu constater que les quantités de carbone absorbées par l'Amazonie en particulier allaient en diminuant à cause de la hausse des températures et des sécheresses de plus en plus régulières. Les prédictions estimées ne sont pas optimistes : d'ici 2030 les forêts tropicales africaines continueront d'absorber de moins en moins de carbone et l'Amazonie ne stockera plus du tout de carbone. Le pire scénario prédisant même que l'Amazonie finira par émettre plus de carbone qu'elle en absorbe. Le botaniste et écologue Daniel Sabatier explique sur France Culture dans La Méthode Scientifique<sup>38</sup> l'effet paradoxal du changement climatique. La hausse de la quantité de carbone présente dans l'air accélère la croissance des arbres dont la durée de vie est diminuée tout comme leur capacité de stockage. S'ajoute à cela le fait que les arbres qui meurent émettent une partie du carbone qu'ils stockaient dans l'atmosphère. Cette dynamique s'amplifie au fur et à mesure que la densité d'arbres diminue et que les forêts perdent leur capacité à se créer un microclimat protecteur.

"Dans certaines régions d'Amazonie on a jusqu'à 300 espèces d'arbres par hectare de forêt ; en Guyane, jusqu'à 200 espèces d'arbres... On appelle cela la communauté d'arbres forestiers... En bien elle va être très impactée par cette dynamique forestière, et va notamment changer certains traits fonctionnels globaux de la forêt. La densité des bois moyenne d'une forêt est très reliée à la dynamique forestière... et elle va baisser avec le réchauffement climatique." Daniel Sabatier

Plus les forêts se détériorent, moins elles résistent aux changements climatiques, plus elles émettent de carbone et plus le réchauffement climatique s'accélère.

Sauver les forêts existantes semble être l'objectif de l'entreprise La Belle forêt. Chez La Belle Forêt, start-up dont l'objectif est la vente de crédits carbone aux entreprises, leur but est de ne pas planter de nouvelles forêts mais plutôt d'entretenir celles déjà existantes. Selon Matthieu de Lesseux, son CEO, les forêts françaises se portent déjà très mal. Elles dépérissent dans pleins d'endroits, notamment à cause du changement climatique

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup>.France Culture. « Arrivées à saturation, les forêts tropicales vont cesser d'absorber du CO2 ». Consulté le 5 janvier 2022. https://www.franceculture.fr/environnement/les-forets-tropicales-pourraient-bientot-emettre-du-co2-au-lieu-den-absorber.

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup>.France Culture. « Forêt amazonienne à bout de souffle ? » Consulté le 10 janvier 2022. https://www.franceculture.fr/emissions/lamethode-scientifique/foret-amazonienne-bout-de-souffle.

qui augmente le stress hydrique auquel elles sont exposées. Entre 2018 et 2020, près de 300 000 hectares sont partis en dépérissement, soit 40 fois la surface de Paris. Pour lui, la priorité est de protéger et restaurer ces forêts déjà existantes ainsi que la biodiversité qu'elles abritent plutôt que de créer artificiellement de nouvelles forêts.

"Dans le marché de la compensation carbone, nous pensons que la plantation d'arbres est quelque chose de trop facile, en tout cas qui permet aux gens de se déculpabiliser. Je pense par exemple aux offres Air France, proposant de payer quelques euros pour compenser l'empreinte carbone de son billet en plantant un arbre. Avec ces offres, on ne fait aucune pédagogie : quel arbre va-t-on planter ? Où ? Quand ? Et comment ? Ce sont des offres marketing simplistes auxquelles les gens cèdent en se disant que oui planter un arbre c'est bien mais sans trop réfléchir plus que cela alors que dans certains cas, planter un arbre peut s'avérer catastrophique".

Outre l'aspect greenwashing des offres proposant de planter une forêt, Matthieu de Lesseux pointe du doigt la façon dont sont gérées ces nouvelles forêts. Selon lui, ces forêts sont souvent plantées en monoculture, ce qui est une catastrophe pour la biodiversité. Elles exercent de plus une forte pression sur la ressource en eau puisqu'une forêt puise beaucoup d'eau, ce qui modifie l'environnement local. Si la ressource en eau n'est pas suffisante, la forêt a de fortes chances de ne même pas passer le cap des 2 ans alors qu'il faut 5 à 7 ans avant que l'on ait un stockage de carbone annuel conséquent.

#### Conclusion

Quand on parle de compensation carbone par reforestation, la viabilité économique et technologique est particulièrement discutable, en raison de la "concurrence" des autres solutions existantes. Parmi elles, nous pouvons souligner, d'une part, la simple limitation de la déforestation - ce qui identifie une mesure de prévention plutôt qu'une intervention - et, d'autre part, l'utilisation de technologies alternatives pour le stockage et le contrôle du carbone. Ceci s'agit des NETs (Negative Emissions Technologies), également appelées "greenhouse gas reduction (GGR) technologies", qui, comme la reforestation, servent de solutions d'atténuation du niveau de carbone dans l'atmosphère. Ces NETs sont des procédés chimiques ou physiques qui peuvent être appliqués pour capturer le CO2, soit de l'air atmosphérique, soit des sorties de gaz d'exhaustion des usines émettrices. Le CO2 capturé et mis en forme liquide pour ensuite être enfoui dans des couches profondes au sous-sol.

Il est clair que les arbres se manifestent comme un agent puissant dans la compensation du carbone, mais au cours des dernières années, de plus en plus d'attention a été accordée aux NETs comme alternatives et solutions complémentaires au problème. Néanmoins, en règle générale, ces technologies sont au stade conceptuel ou expérimental et, pour la grande majorité des projets développés, il n'y a eu aucun projet avec des résultats prometteurs et rentables. Les NETs sont extrêmement limitées et ne sont pas encore disponibles sur le marché au moment présent<sup>39</sup>.

Le point de vue de M. Busch reflète cette idée :

-

"Je soutiens tous ces différents types de technologies qui élimineraient le carbone de l'atmosphère, et j'espère qu'elles vont fonctionner. [...] Mais à l'exception de quelques-unes, comme la centrale en Islande qui n'a commencé que récemment à agir sur le carbone, elles sont

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram, C., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Gusti, M., Harmsen, M., Keramidas, K., Ochi, Y., Oshiro, K., Rochedo, P., van Ruijven, B., Cabardos, A.-M., Deppermann, A., Fosse, F., Havlik, P., ... Riahi, K. (2021). Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. Nature Sustainability, 4(12), 1052–1059. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00772-w

encore en phase de test et de laboratoire, et sont, à ce stade, encore très chères pour peu de carbone en retour. [...] J'espère qu'elles vont fonctionner, mais pour l'instant les arbres fonctionnent beaucoup mieux."

#### Références

#### Article de revue scientifique

Busch, J., Engelmann, J., Cook-Patton, S. C., Griscom, B. W., Kroeger, T., Possingham, H., & Shyamsundar, P. (2019). Potential for low-cost carbon dioxide removal through tropical reforestation. Nature Climate Change, 9(6), 463-466. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0485-x

Canadell, J. G., & Raupach, M. R. (2008). Managing Forests for Climate Change Mitigation. Science, 320(5882), 1456-1457. https://doi.org/10.1126/science.1155458

Erb, K.-H. (2004). Land use?related Changes in Aboveground Carbon Stocks of Austria?s Terrestrial Ecosystems. Ecosystems, 7(5). https://doi.org/10.1007/s10021-004-0234-4

Harvey, F. (2021). Reforestation hopes threaten global food security, Oxfam warns, (carbon offsetting). Repéré à https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/03/reforestation-hopes-threaten-global-food-security-oxfam-warns.

Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram, C., Després, J., ... Riahi, K. (2021). Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. Nature Sustainability, 4(12), 1052-1059. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00772-w

Hubau, W., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Affum-Baffoe, K., Beeckman, H., Cuní-Sanchez, A., ... Zemagho, L. (2020). Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. Nature, 579(7797), 80-87. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0

Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., ... Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma, 137(3-4), 253-268. <a href="https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003">https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003</a>

Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science, 304(5677), 1623-1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396

Law, B. E., Hudiburg, T. W., Berner, L. T., Kent, J. J., Buotte, P. C., & Harmon, M. E. (2018). Land use strategies to mitigate climate change in carbon dense temperate forests. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(14), 3663-3668. https://doi.org/10.1073/pnas.1720064115

Sen, Aditi, et Nafkote Dabi. (2021). Tightening the Net : Net zero climate targets – implications for land and food equity. Repéré à <a href="https://doi.org/10.21201/2021.7796">https://doi.org/10.21201/2021.7796</a>.

Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S. J., Joosten, H., Holmgren, P., ... Wattenbach, M. (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. Environmental Evidence, 1(1), 6. <a href="https://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6">https://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6</a>

Pugh, T. A. M., Lindeskog, M., Smith, B., Poulter, B., Arneth, A., Haverd, V., & Calle, L. (2019). Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(10), 4382-4387. https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116

Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J.-P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., ... Moore, B. (2021). Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. Nature Climate Change, 11(5), 442-448. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5

Seddon, N., Smith, A., Smith, P., Key, I., Chausson, A., Girardin, C., ... Turner, B. (2021). Getting the message right on nature-based solutions to climate change. Global Change Biology, 27(8), 1518-1546. https://doi.org/10.1111/gcb.15513

Zomer, R. J., Trabucco, A., Bossio, D. A., & Verchot, L. V. (2008). Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. Agriculture, Ecosystems & Environment, 126(1-2), 67-80. <a href="https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.014">https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.014</a>

#### Entretiens

De Laisseux, M. (2021, 3 décembre). Interview with Matthieu de Laisseux, CEO of La Belle Foret.

Entretien avec M. Jonah Busch, PhD Université de Californie Santa Barbara, 5 novembre 2021.

Entretien avec Xavier Morin, directeur de recherche au CNRS, le 16/12/2021

Entretien avec Jean-Pierre Wigneron, directeur de recherche à l'INRAE Bordeaux, le 14/12/2021

#### Podcasts

FranceInter. (n.d.-a). La forêt française se meurt. Repéré à <a href="https://www.franceinter.fr/emissions/la-terre-au-carre/la-terre-au-carre/la-terre-au-carre-21-novembre-2019">https://www.franceinter.fr/emissions/la-terre-au-carre/la-terre-au-carre-la-terre-au-

Francelter. (n.d.-b). Les forêts françaises et l'évaluation de leur état. Repéré à <a href="https://www.franceinter.fr/emissions/la-terre-au-carre-15-juin-2021">https://www.franceinter.fr/emissions/la-terre-au-carre-15-juin-2021</a>

#### Lois

Loi climat et résilience : L'écologie dans nos vies (2021). Repéré à https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience

LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1) (2021-1104) (2021).

#### Sites Internet

Arrivées à saturation, les forêts tropicales vont cesser d'absorber du CO2. (n.d.). France Culture. Repéré à <a href="https://www.franceculture.fr/environnement/les-forets-tropicales-pourraient-bientot-emettre-du-co2-au-lieu-den-absorber">https://www.franceculture.fr/environnement/les-forets-tropicales-pourraient-bientot-emettre-du-co2-au-lieu-den-absorber</a>

Cartographie par satellite des changements dans la séquestration du carbone forestier. (2021, 29 octobre). INRAE Institutionnel. Repéré à <a href="https://www.inrae.fr/actualites/cartographie-satellite-changements-sequestration-du-carbone-forestier">https://www.inrae.fr/actualites/cartographie-satellite-changements-sequestration-du-carbone-forestier</a>

NCASI22\_Forest\_Carbon\_YoungVsOld\_print.pdf. (n.d.). Repéré à <a href="https://www.ncasi.org/wp-content/uploads/2021/01/NCASI22">https://www.ncasi.org/wp-content/uploads/2021/01/NCASI22</a> Forest Carbon YoungVsOld print.pdf

Dérèglement climatique : La forêt amazonienne, un puits de carbone en perdition. (2021, 4 mai). Euronews. Repéré à <a href="https://fr.euronews.com/2021/05/04/dereglement-climatique-la-foret-amazonienne-un-puits-de-carbone-en-perdition">https://fr.euronews.com/2021/05/04/dereglement-climatique-la-foret-amazonienne-un-puits-de-carbone-en-perdition</a>

Forêt amazonienne à bout de souffle ? (n.d.). France Culture. Repéré à <a href="https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/foret-amazonienne-bout-de-souffle">https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/foret-amazonienne-bout-de-souffle</a>

Kayrros. (2021, 29 octobre). Communiqué de presse suite au lancement du produit Biomass Carbon Monitor le 29 octobre 2021. Repéré à <a href="https://www.kayrros.com/wp-content/uploads/2021/10/COMMUNIQUE-DE-PRESSE-29102021-Biomass-Carbon-Monitor.pdf">https://www.kayrros.com/wp-content/uploads/2021/10/COMMUNIQUE-DE-PRESSE-29102021-Biomass-Carbon-Monitor.pdf</a>

New study finds young forests have a huge climate impact. (2019, 26 février). Mongabay Environmental News. Repéré à <a href="https://news.mongabay.com/2019/02/new-study-finds-young-forests-have-a-huge-climate-impact/">https://news.mongabay.com/2019/02/new-study-finds-young-forests-have-a-huge-climate-impact/</a>

Rapports FAO-UN index of deforestation. (n.d.). Repéré à <a href="https://rainforests.mongabay.com/deforestation/2000/?C=M:O=A">https://rainforests.mongabay.com/deforestation/2000/?C=M:O=A</a>

Compensation carbone : Tout sauf neutre ! (n.d.). Repéré à <a href="https://ccfd-terresolidaire.org/nos-publications/nos-communiques-de/compensation-carbone-7131">https://ccfd-terresolidaire.org/nos-publications/nos-communiques-de/compensation-carbone-7131</a>

Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size | Nature. (n.d.). Repéré à <a href="https://www.nature.com/articles/nature12914">https://www.nature.com/articles/nature12914</a>

Tall and old or dense and young: Which kind of forest is better for the climate? (2019, 23 mai). Mongabay Environmental News. Repéré à <a href="https://news.mongabay.com/2019/05/tall-and-old-or-dense-and-young-which-kind-of-forest-is-better-for-the-climate/">https://news.mongabay.com/2019/05/tall-and-old-or-dense-and-young-which-kind-of-forest-is-better-for-the-climate/</a>

Trillion Trees. (n.d.). Repéré à https://trilliontrees.org/why-forests

Wigneron, J.-P., & Ciais, P. (2021, 12 juin). Rôle des forêts dans le bilan de carbone de la planète. Planet-Vie. Repéré à <a href="https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/role-des-forets-dans-le-bilan-de-carbone-de-la-planete">https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/role-des-forets-dans-le-bilan-de-carbone-de-la-planete</a>