



Available online at <http://www.ifgdg.org>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 17(3): 1185-1198, April 2023

ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print)

**International Journal
of Biological and
Chemical Sciences**

Review Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Impact de la production de charbon de bois sur les facteurs de changement climatique : synthèse de la littérature

Kuassi N. ALAWENON*, Adigla Appolinaire WEDJANGNON et
Christine A. I. Nougbodé OUINSAVI

*Laboratoire d'Etudes et de Recherches Forestières (LERF), Faculté d'Agronomie, Université de Parakou,
BP 123 Parakou, Bénin.*

**Auteur correspondant; E-mail knalawenon@gmail.com; Tél. +229 95713159*

Received: 26-12-2022

Accepted: 24-04-2023

Published: 30-04-2023

RESUME

La carbonisation est une activité humaine impliquant de fortes pressions sur les forêts tropicales dans le présent contexte de changement climatique. Ce travail visait à faire une synthèse des études menées sur la séquestration de carbone et les émissions de gaz à effet de serre dues à la carbonisation. Pour ce faire, un ensemble d'équations de recherche a été mis en place avec des mots clés mis en combinaison avec des connecteurs booléens. L'équation prenant en compte des publications en français comme en anglais a été retenue. Le principal moteur de recherche utilisé est SCOPUS. Ainsi, l'analyse factuelle de 601 publications recensées faisait ressortir trois regroupements majeurs de recherche. Le premier traitait des sujets relatifs aux écosystèmes, aux changements observés, et différentes méthodes de séquestration du carbone. Le deuxième traitait de la carbonisation du bois et les émissions de CO₂. Quant au troisième, les publications étaient plus orientées vers la recherche de solutions aux défis des changements climatiques. Cependant, des relations significatives étaient observées entre les groupes. Beaucoup d'efforts restent à faire en Afrique, surtout au Bénin, où très peu d'études renseignent sur le niveau de séquestration du carbone. Il serait donc intéressant d'ouvrir et d'approfondir les recherches dans ce sens.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : carbonisation, séquestration de carbone, changement climatique, estimation de biomasse, charbon

Impact of charcoal production on climate change factors: a review

ABSTRACT

Charcoal production is a human activity that involves intense pressures on tropical forests in the present context of climate change. This work aimed to make a synthesis of the studies carried out on carbon sequestration and greenhouse gas emissions due to charcoal production. For that, a set of search equations was set up with keywords put in combination with Boolean connectors. The equation that considered publications in both French and English was retained. The main search engine used is SCOPUS. Thus, the factual analysis of 601 publications surveyed highlights three major research groups. The first deals with subjects relating to ecosystems, the changes observed, and the different methods used in carbon sequestration. The second deals with charcoal production, and CO₂ emissions. As for the third, the publications are more oriented towards searching for solutions to the

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i3.33>

9339-IJBCS

challenges of climate change. However, significant relations between the groups can be observed. Much effort remains to be done in Africa, especially in a country like Benin, where very few studies provide information on the level of carbon sequestration. It would therefore be interesting to open and deepen research in this direction. © 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords : Charcoal production, carbon sequestration, climate change, biomass estimation, charcoal

INTRODUCTION

La question du changement climatique est devenue très préoccupante depuis quelques décennies (Kabbej et Tasse, 2021). Les climats sont sérieusement perturbés avec un réchauffement climatique avéré dans tout le monde entier. Dans le même temps, les populations en quête de revenus économiques s'adonnent à une surexploitation des écosystèmes forestiers bien que ceux-ci jouent un rôle important dans les processus d'atténuation du réchauffement climatique (Folahan et al., 2018). Dans son rapport sur l'évaluation des ressources forestières mondiales, l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), a noté que bien qu'il y ait eu un recul de la déforestation durant ces dix dernières années grâce aux programmes nationaux de reboisement et de la législation sur les forêts, la déforestation se poursuit à un rythme alarmant dans certaines régions du monde telles que l'Amérique du sud, l'Afrique et l'Océanie (FAO, 2010). Entre 2000 et 2010, l'Afrique aurait perdu 3,4 millions d'hectares de forêts (FAO, 2009). En Afrique de l'ouest et particulièrement au Bénin, les maigres ressources forestières disponibles ces dernières années ont été le résultat d'une dégradation des forêts par l'homme depuis plusieurs décennies (Houévogawa et al., 2014). De nos jours, les pressions humaines sur les forêts sont encore très fortes (Houévogawa et al., 2014 ; Tsewoue et al., 2020). D'après Py-Saragaglia et al. (2019), les hommes ont façonné les forêts et les zones incultes boisées pour répondre à leurs besoins en combustible domestique. Ces pressions se font par l'utilisation abusive du bois pour la fabrication du charbon, la cuisson des aliments (bois énergie), la construction, le commerce (bois comme source économique). Tout ceci se passe en ignorant ou banalisant le rôle important que jouent les forêts dans la séquestration du carbone à travers l'absorption du dioxyde de carbone (CO₂) qui est un gaz à

effet de serre. Pour Ciza et al. (2015), les causes de la déforestation et de la dégradation des forêts sont l'agriculture itinérante sur brûlis et l'exploitation de bois (bois de chauffage, charbon de bois et bois de construction. Nair et al. (2010) ont fait valoir que la séquestration de carbone de surface dans les arbres est directement liée à la gestion des phénomènes de changement climatique à travers la réduction de réchauffement par absorption des gaz à effet de serre. L'accumulation et le stockage à longue durée de l'excédent de CO₂ par les forêts a été une des grandes approches de limitation des gaz à effet de serre promues par les institutions internationales de gestion de l'environnement (Brown, 1997 ; GIEC, 2013). Pour la plupart des travaux scientifiques, la région tropicale est par excellence la zone de production de gaz à effet de serre à cause de la forte dégradation des forêts pour la production de charbon de bois (Chidumayo et Gumbo, 2013). Les émissions lors de la production de charbon de bois ont une plus grande contribution au réchauffement climatique que les émissions lors de la combustion du charbon (Kammen et Lew, 2005). Il est alors important de chercher à mieux comprendre et à déterminer l'impact de la carbonisation du bois sur les facteurs du changement climatique et la capacité actuelle des massifs forestiers à stocker du carbone.

L'objectif de cette synthèse était de faire l'état des lieux des connaissances sur les méthodes de séquestration de carbone des forêts et l'impact de la carbonisation du bois sur les facteurs du changement climatique à l'échelle globale.

RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Pour atteindre cet objectif, une recherche documentaire a été réalisée en utilisant une démarche d'une revue systématique. Selon Nambiema et al. (2021), une revue systématique consiste à « chercher à identifier, sélectionner, évaluer et synthétiser

des études primaires, des données et des résultats de recherche sur une question précise qui répondent à des critères d'éligibilité préétablis afin de répondre à une question de recherche précise ». Afin d'identifier, dans notre cas d'espèce, les contributions scientifiques allant dans le sens « de l'Impact de la carbonisation du bois sur les facteurs du changement climatique », l'approche méthodologique décrite par Fink (2014) pour la revue systématique de la littérature, a été suivie. Cependant, pour répondre à la question de recherche, des mots clés en combinaison avec des connecteurs booléens ont été définis. Les mots clés utilisés sont : Carbonisation du bois, Séquestration de carbone, Changement climatique, estimation de la biomasse et Charbon. De plus, dans le but d'élargir le champ de recherche, ces mots clés ont été traduits respectivement en anglais, à savoir : wood charcoal production, Carbon sequestration, Climate change, biomass estimation, charcoal. Les connecteurs Booléens et ou « AND and OR) ont été utilisés lors des recherches. Ces mots clés ont été utilisés dans une recherche combinatoire avec les connecteurs, ce qui a permis de mettre en place un ensemble d'équations de recherche. Qui sont :

-“Carbonisation AND bois OR Séquestration AND carbone OR Changement AND climatique OR estimation OR biomasse

OR Charbon” qui nous a permis d'avoir 22 documents de recherche exploitables.

-“wood AND charcoal AND production, Or carbon AND sequestration, OR climate AND change, OR biomass AND estimation, OR charcoal” qui nous a permis d'avoir plus de 601 documents exploitables.

La dernière équation de recherche a été retenue pour la suite des opérations de recherche, car elle présente de nombreux avantages. L'un des avantages majeurs a été la prise en compte des recherches scientifiques en français comme en anglais. La procédure méthodologique pour la revue systématique de la littérature est donnée dans la Figure 1.

TYPES D'ANALYSES

Au total, 601 publications ont été chargées sur la plateforme de recherche SCOPUS, après insertion des équations de recherche. Ces références étaient en liens directes et indirectes avec la thématique d'étude. La base de données a été établie en fonction des titres, des résumés et des mots clés des fichiers publiés

En outre, chacune de ces références a fait l'objet d'une analyse bibliométrique suivante : les types de documents, les domaines de publication, le nombre de publication par année, les auteurs et les pays ayant le plus publié.

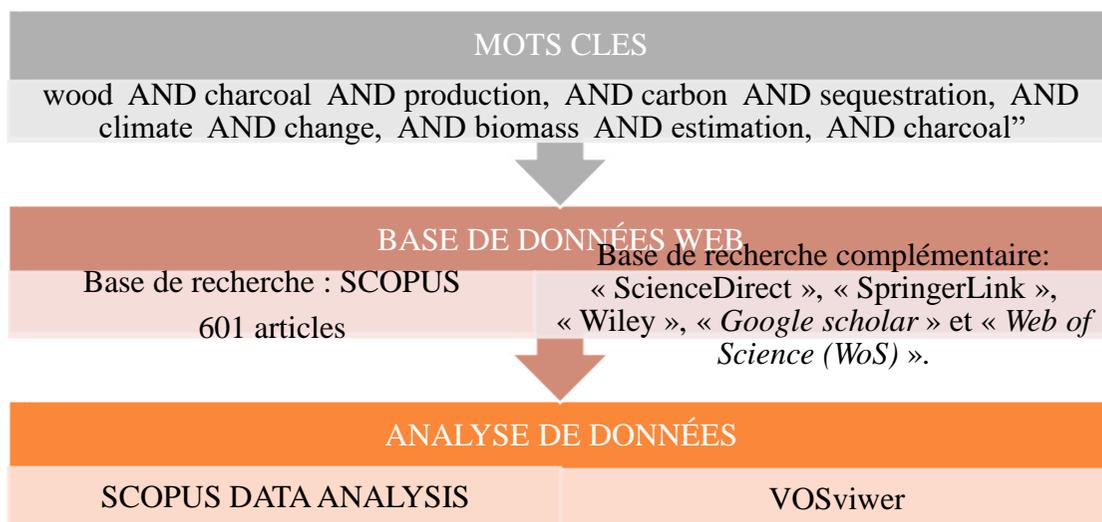


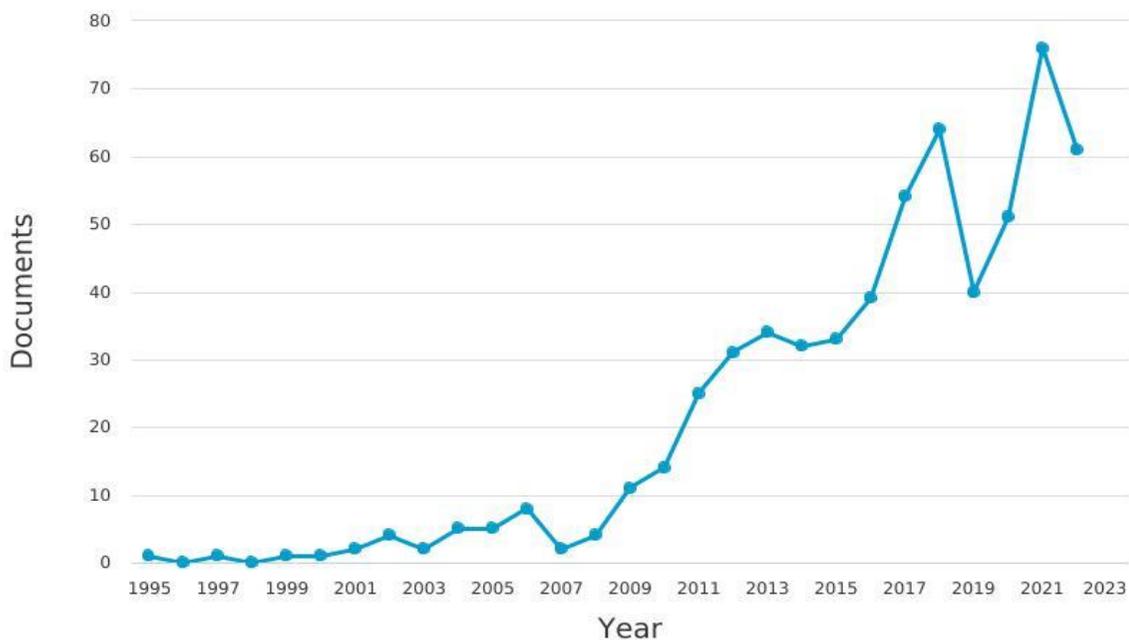
Figure 1 : Procédure méthodologique de la revue systématique.

ANALYSE BIBLIOMETRIQUE

L'analyse bibliométrique de 601 publications sur une période de 52 ans a indiqué que le nombre de publications en lien avec la thématique de l'étude a connu une grande croissance à partir de 2007 (Figure 2). Les pays ayant produit les nombres les plus élevés de publication étaient respectivement les USA, la Chine, l'Australie, l'Angleterre, l'Allemagne, l'Inde, le Canada et l'Espagne (Figure 3). Les domaines scientifiques avec plus de publications étaient les sciences environnementales (32,3%), les sciences de l'agriculture (26,4%) et les sciences de la terre (8,4%) des publications (Figure 4). Les types de documents les plus publiés étaient des articles (60,4%), les revues (18,5%), les livres (12,0%) et les chapitres de livres (7,5%) (Figure 5).

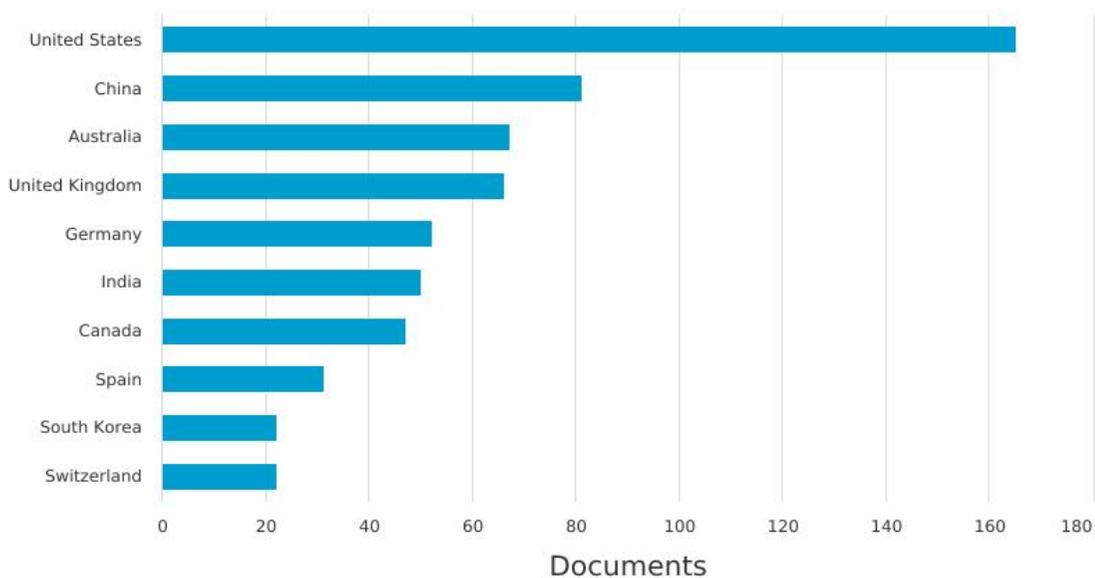
L'analyse factuelle (Figure 6), des publications sur la base de leur titre et des mots

clés, a montré trois regroupements majeurs de recherche. Le premier groupe traitait des sujets qui avaient trait aux écosystèmes, aux changements observés, aux différentes méthodes employées dans la séquestration du carbone. Le deuxième groupe traitait de la production du charbon, de la carbonisation du bois, des émissions de CO₂, ces groupes de chercheurs s'efforçaient à comprendre les conséquences des mauvaises pratiques d'usages sur l'écosystème immédiat. Quant au troisième groupe, les publications étaient plus orientées dans la recherche de solution pour faire face aux challenges et aux défis des changements climatiques. Cependant, on peut observer des relations significatives entre les différents groupes, comme le montre la Figure 6, entre le désir de comprendre le processus de séquestration de carbone, de réduction des émissions de CO₂ et de trouver des solutions afin de freiner la carbonisation du bois.



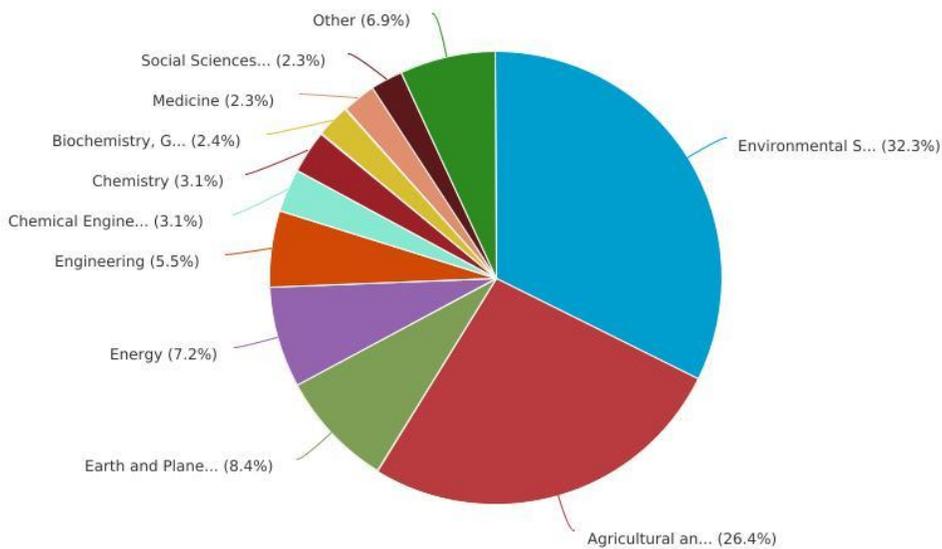
Copyright © 2022 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Figure 2 : Publications annuelles 1970-2022.



Copyright © 2022 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Figure 3 : Les pays avec plus de publications.



Copyright © 2022 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Figure 4 : Domaines scientifiques de publications.

ANALYSE THEMATIQUE

La récente Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP26) a souligné l'importance de l'Accord de Paris (Abis et Brun, 2021 ; Kabbej et Tasse, 2021). Des technologies telles que la capture, l'utilisation et le stockage du carbone (CCUS) pourraient contribuer à limiter l'augmentation moyenne de la température mondiale à 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels (Guiot, 2017). Le CCUS est un concept impliquant la capture du dioxyde de carbone (CO₂) à partir de sources fixes et sa distribution ultérieure à diverses utilisations et/ou options de stockage (Midilli et al., 2005 ; Quinet et al., 2019). Certaines technologies connexes visent à atténuer le changement climatique par la séquestration à long terme du CO₂ dans des puits non atmosphériques tels que les aquifères salins et d'autres formations géologiques (Mayer et al., 2020). Ces processus sont classés dans les technologies de capture et de stockage du carbone (CSC).

SEQUESTRATION DU CARBONE ET FACTEURS CLIMATIQUES

La séquestration du carbone est le stockage à long terme relativement stable du carbone dans les océans, les sols, la végétation (en particulier les forêts photosynthétiques) et les formations géologiques (Czernichowski-Lauriol, 2020). La séquestration du carbone est une approche qui suscite depuis peu l'intérêt de nombreux chercheurs (Guiot, 2017; Kouassi et al., 2018 ; Andrianantenaina, 2019 ; Barré et al., 2020 ; Manlay et al., 2020 ; Saradoum et al., 2022). Ce processus est étroitement lié au mandat de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) du Protocole de Kyoto, établi en 2004 (Bettin, 2021). La séquestration du dioxyde de carbone est associée à la capture de ses composés dans l'environnement, réduisant ainsi le processus d'émission de gaz à effet de serre.

Il existe deux approches de base pour la séquestration du carbone : les approches directe et indirecte (Barabé, 2019). La méthode directe est réalisée en liant les composés carbonés à la source de leur formation juste

avant leur entrée dans l'atmosphère (Tyano et al., 2019). Il s'agit du Carbone combiné pour le stockage à long terme dans des décharges spécialement désignées, correctement protégées et respectueuses de l'environnement. La deuxième méthode de séquestration, indirecte, implique l'utilisation de plantes qui fixent le CO₂ lors de la photosynthèse ou lorsque des composés carbonés sont liés dans l'environnement du sol (Barré et al., 2020). Dans ces méthodes, l'isolement peut se produire impliquant des processus physiques, chimiques ou biologiques. La séquestration du carbone est également possible grâce à des méthodes avancées.

La bio séquestration du carbone comprend des méthodes indirectes. Les plus importantes d'entre elles comprennent le boisement (écosystèmes forestiers), la séquestration de la biosphère, la culture appropriée des terres (agriculture), les marécages, la tourbe et la fertilisation marine (Kombate et al., 2019).

Les émissions massives de gaz à effet de serre comme le CO₂ sont l'un des effets de l'activité humaine. Le boisement et les zones forestières bien gérées sont des exemples de moyens efficaces pour séquestrer le carbone de l'atmosphère. Le stockage du carbone par les forêts peut se produire dans leur biomasse ou dans le sol dans lequel elles poussent (Bodiguel, 2021). La séquestration, y compris la biomasse des arbres, a lieu au-dessus du sol et sous le sol. Les fruits des bois absorbent le CO₂, réduisant ainsi la contribution de ce composé à l'effet de serre (Mderssa et al., 2022). La capacité d'un arbre à absorber le dioxyde de carbone de l'atmosphère dépend principalement de son espèce, de son stade de développement, du type de sol et des facteurs climatiques.

L'intensité de l'absorption de CO₂ par les écosystèmes forestiers dépend fortement des facteurs climatiques, de la température, de l'humidité et de la fertilité des sols (Lourtioz et al., 2022). Un traitement important qui a un effet positif sur la séquestration du carbone est le reboisement ou l'utilisation d'espèces d'arbres appropriées. Une autre méthode de

séquestration biologique du carbone est la séquestration utilisant la biosphère (Robert et Saugier, 2003). Cette méthode comprend le traitement de différents types d'environnement, par exemple, l'eau, la forêt, le sol, avec des méthodes de traitement appropriées.

L'agriculture joue également un rôle important dans la séquestration du carbone (Manlay et al., 2020). Les zones correctement cultivées pouvaient être une source de grandes quantités de carbone qui s'accumule dans le sol. Pour rendre le processus de captage du carbone de l'environnement du sol encore plus efficace, plusieurs méthodes avantageuses peuvent être utilisées. L'une d'elles est la prévention de l'érosion des sols en maintenant une teneur appropriée en matière organique dans le sol, grâce à des activités telles que la fertilisation appropriée du sol avec le bon engrais et la bonne composition du sol (Renald, 2021).

Il existe de nombreuses méthodes de séquestration du carbone, certaines plus avancées et d'autres moins avancées. Toutes les activités réalisées visaient à fixer le charbon actif. Malgré de nombreuses améliorations, les méthodes biologiques décrites n'offraient toujours pas une efficacité à 100% de séquestration parfaite du carbone, qui se produit sous de nombreuses formes dans de nombreux écosystèmes (Nogues et al., 2021). Même de petites quantités de carbone libérées au fil du temps pouvaient entraîner une libération soudaine, échouant ainsi à l'efficacité attendue du processus de séquestration.

Méthode de séquestration du carbone

Le terme séquestration du CO₂ fait référence à un ensemble de technologies conçues pour séparer le CO₂ des gaz de combustion résiduels émis lors de la combustion de combustibles fossiles (Jung et al., 2019). Ces techniques ont différents domaines d'application et différents degrés de maturité. Sans entrer dans les détails, nous pouvons dresser la liste suivante.

Absorption : cette approche est utilisée avant ou après la combustion pour absorber le CO₂ avec un solvant chimique ou physique et le régénérer pour un nouveau cycle d'absorption.

Il s'agit d'une technologie mature utilisée dans de nombreuses industries telles que le ciment, l'acier et le raffinage du pétrole. Les solvants les plus couramment utilisés sont les amines. Il s'agit d'une grande famille de solvants organiques utilisés seuls ou en combinaison. Cependant, ce processus libère de petites quantités d'ammoniac et des traces de nitrosamines et de nitramines (cancérogènes potentiels) dans l'environnement. Outre ces émissions, le principal inconvénient de ce procédé, est le coût énergétique élevé et la corrosion des équipements qu'il peut provoquer (Dabos et al., 2019 ; Sokolov, 2020 ; Dogniaux, 2021).

Membrane : ce procédé consiste à faire passer le flux à travers une membrane pour séparer le CO₂ des autres gaz. Le processus d'osmose est entraîné par une simple différence de pression à travers la membrane, ce qui la rend très économe en énergie. Il existe différents types de membranes aux propriétés différentes. Cependant, la faible pression du flux rend difficile son utilisation en postcombustion. Cette technique est plus adaptée aux techniques de précombustion qui produisent un débit de pression plus élevé. La séparation du CO₂ par des membranes est complexe, nécessitant souvent plusieurs étapes et la séparation du gaz en différents flux. Les gaz de combustion utilisés doivent être très purs, ce qui augmente les coûts d'exploitation (Michaud, 2019 ; Bouillon, 2021).

Adsorption : Le point commun de ces processus est que le flux passe à travers divers matériaux poreux qui absorbent le CO₂. Certains de ces matériaux sont déjà utilisés à petite échelle, tandis que d'autres sont encore au stade expérimental. Certains matériaux fonctionnent à des températures élevées (oxyde de calcium, zirconates, etc.), tandis que d'autres fonctionnent à des températures modérées (charbon actif, nanotubes de carbone, graphène, etc.). La technologie exacte sera choisie en fonction de la maturité du processus industriel de décarbonation. Les recherches existantes se concentrent souvent sur la capacité d'absorption et ignorent le rendement énergétique final du processus. Dans

l'ensemble, la technologie est encore au stade expérimental (Kaur et al., 2019 ; Keshavarz et al., 2021 ; Jeong-Potter et al., 2022).

Combustion à cycle/boucle chimique : Semblable à l'oxycombustion, cette technologie consiste à brûler un combustible (généralement du gaz naturel) dans un lit fluidisé d'oxydes métalliques généralement catalytiques. Ce lit fournit l'oxygène nécessaire à la combustion. Les particules métalliques réduites sont ensuite transférées vers un second lit où elles sont mises en contact avec de l'air et réoxygénées. La combustion d'un combustible sans contact direct avec l'air produit un flux contenant essentiellement du CO₂ et de la vapeur d'eau (séparée facilement par condensation). Cette technologie offre le potentiel de capter jusqu'à 98% du CO₂ émis à des coûts énergétiques très faibles, mais n'est actuellement utilisée qu'à l'échelle d'une usine pilote pour le captage du CO₂. Les combustibles solides créent des problèmes de cendres qui affectent négativement l'efficacité et la durée de vie des lits d'oxydes métalliques. La recherche porte sur l'optimisation de la chambre de combustion pour favoriser une combustion complète du carburant (Bercegol et al., 2019 ; Greiner, 2021).

Stockage par minéralisation : Dans ce processus, un flux de CO₂ réagit avec des minéraux contenant du calcium ou du magnésium, notamment l'olivine et la serpentine, pour produire du carbonate de calcium ou de magnésium. Ainsi, il assure la séparation et le stockage permanent du CO₂ en une seule étape. Cela peut s'appliquer à des matériaux concassés transportés vers des sites industriels pour être décarbonés ou à une formation assurant un stockage permanent, procédé appelé minéralisation in situ du carbone, vous pouvez le faire directement en l'injectant. Une variante de cette approche a consisté à utiliser des résidus industriels alcalins (cendres, poussière de ciment, scories d'acier, etc.) pour générer des carbonates (García-Gutiérrez, 2016). Ces processus étaient encore relativement immatures, basés sur des réactions chimiques qui se produisaient à des températures élevées (150-600°C), et

étaient donc énergivores. Ils étaient également lents (6-24 heures) et la recherche visait à les accélérer (Delerce et Oelkers, 2022).

PRODUCTION DU CHARBON DE BOIS EN AFRIQUE : CAS DU BENIN

La consommation de bois énergie est aujourd'hui l'une des principales préoccupations des gouvernements des pays africains en général et du Bénin en particulier (Bordé et al., 2020). Ces gouvernements doivent faire face aux impacts négatifs du changement climatique et répondre aux besoins croissants en auto-énergie des populations urbaines et rurales. Le bois-énergie reste le combustible le plus utilisé au Bénin (Issifou et al., 2020), malgré un basculement important vers la consommation de gaz butane (Joseph et Biaou, 2017).

Au Bénin, le bois de chauffage et le charbon de bois représentaient plus de 80% des besoins énergétiques totaux des ménages. La demande en bois énergie était estimée à plus de 3 millions de tonnes par an et pourrait avoir atteint et dépassé 7,5 millions de tonnes en 2017 (Joseph et Biaou, 2017). Malheureusement, la méthode de fabrication du charbon de bois était très archaïque. Il s'agissait de la carbonisation de la poterie par combustion partielle dans des moulin à pierre, et son efficacité gravimétrique de conversion du bois en énergie était faible tant pour la production que pour l'utilisation finale (Issifou et al., 2020). Les rendements de carbonisation étaient compris entre 15% et 20% (Joseph et Biaou, 2017). Cela signifiait qu'au moins 100 kg de bois produiront 15 à 20 kg de charbon de bois avec une perte de 80 à 85 kg de bois. Ce rendement est presque deux à trois fois inférieur au taux de conversion moyen recommandé par la FAO (1985) de 4 à 6 %. En conséquence, la production de charbon de bois entraînait une perte importante de ressources en bois (Dossou, 1992). Certaines de ces études portaient sur l'évaluation des techniques et procédés de carbonisation. D'autres décrivaient les acteurs et les flux financiers associés au commerce du bois de chauffe (Tossou, 1993 ; Biaou, 1995 ; LIFAD, 1999). Cependant,

malgré la richesse de la documentation disponible sur la filière bois-énergie et en particulier ceux traitant de la carbonisation du bois, force est de constater que peu d'études ont approfondi les aspects pertinents d'une évaluation axée sur la séquestration du carbone et sur les paramètres climatiques. Cela est certainement dû aux limitations techniques liées à l'ignorance des dépôts, aux limitations liées au manque de formation et d'information des parties prenantes, aux limitations institutionnelles et réglementaires et aux limitations économiques et financières.

CONCLUSION

Les années 2020 et 2021 sont des années charnières pour les technologies de captage, stockage et/ou réutilisation du carbone. Ces travaux ont permis de comprendre que les applications clés visées sont la décarbonation du secteur industriel, en particulier celle des industries à forte intensité énergétique, difficiles à décarboner avec les technologies actuelles (acier, ciment, chimie et pétrochimie) ; la production d'hydrogène bas carbone, afin de massifier la production d'hydrogène et de faciliter la mise en place des infrastructures nécessaires au déploiement de l'hydrogène renouvelable. Cette étude nous a permis de faire le tour des méthodes de séquestration de carbone et de voir les études ayant abordé le lien entre la production de charbon de bois et les facteurs de changement climatique. Cependant, beaucoup d'efforts restent à faire en Afrique, surtout dans un pays comme le Bénin, où très peu d'études renseignent sur le niveau de séquestration du carbone. Il serait donc intéressant d'approfondir les recherches dans ce sens.

CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêt lié à cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Tous les auteurs ont participé à la conception et à la planification de l'étude, puis à la collecte et au traitement des données. KNA a collecté les données et rédigé le premier draft

du manuscrit. AAW, CAINO ont participé à la correction du premier draft du manuscrit. CAINO a supervisé les travaux de collecte, de traitement des données et de rédaction du manuscrit.

REFERENCES

- Abis S, Brun M. 2021. *Le Déméter 2021 : Produire et se Nourrir : le Défi Quotidien d'un Monde Débousolé* (27th edn). Club Déméter : Paris.
- Andrianantenaina AN, Rathgeber CBK, Pérez-de-Lis G, Cuny H, Ruelle J. 2019. Quantifying intra-annual dynamics of carbon sequestration in the forming wood: a novel histologic approach. *Annals of Forest Science*, **76**(62): 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0846-7>
- Barabé V. 2019. Technologies de capture et séquestration de carbone et potentiel de réduction des émissions de GES : analyse comparative des approches les plus prometteuses. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Montréal, p. 86.
- Barré P, Cécillon L, Chenu C, Martin M, Beaudet LV, Eglin T. 2020. La séquestration de carbone dans les sols agricoles, forestiers et urbains : état des lieux des méthodes d'évaluation et de quantification. *Etude et Gestion des Sols*, **27**(1) : 305–320. URL: https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/07/EGS_2020_27_Barre_305-320.pdf
- Bercegol H, Didierjean S, Etienne M, Kalaydjian F, Bideau JL, Lemoine F, Maisonnier G, Maranzana G, Slaoui A. 2019. De nouvelles technologies de l'énergie en rupture ? *Annales des Mines-Responsabilité et Environnement*, **95**(3) : 62–66. DOI: <https://doi.org/10.3917/re1.095.0062>
- Bettin R. 2021. De la compensation du carbone au financement de la neutralité. *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, **102**(2) : 52–54. DOI: <https://doi.org/10.3917/re1.102.0052>

- Biaou CF. 1995. Analyse économique des possibilités de production du bois de feu dans le système cultural paysan du sud Bénin. Thèse de Doctorat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Côte d'Ivoire, p. 218.
- Bodiguel L. 2021. CO₂ vert et bail rural : les interactions entre le contrat de séquestration de carbone et le bail rural. In *Le CO₂ Vert Capturé par le Droit. Le Carbone en Agriculture et en Sylviculture*, Millard B et Bosse-Platière H (eds). LexisNexis ; 131-144.
- Bordé C, Bach JF, Bony JM. 2020. *Sciences et Pays en Développement : Afrique Subsaharienne Francophone*. EDP Sciences: Les Ulis. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-0156-5>
- Bouillon J. 2021. Elaboration de membranes mixtes polymère / réseau métallo-organique pour l'élimination du CO₂. Thèse de Doctorat, Normandie Université, France, p. 336.
- Brown S. 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer. FAO Forestry Paper - 134: Rome.
- Chidumayo E, Gumbo D. 2013. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis. *Energy for Sustainable Development*, **17**(2): 86–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.07.004>
- Ciza SK, Mikwa JF, Malekezi AC, Gond V, Bosela FB. 2015. Identification des Moteurs de Déforestation dans la Région d'Isangi, République Démocratique du Congo. *Bois & Forêts Des Tropiques*, **324**(324) : 29–38. DOI : <https://doi.org/10.19182/bft2015.324.a31264>
- Czernichowski-Lauriol I. 2020. Captage et Stockage du CO₂ : le puits de carbone géologique. *Comptes Rendus Géoscience*, **352**(4-5) : 383–399. DOI : <https://doi.org/10.5802/crgeos.20>
- Dabos M, Tran KH, Baudin G, Genetier M, Serio B, Osmont A. 2019. Mesure des émissions radiatives par spectroscopie infrarouge rapide du CO₂ à 4,17 µm – 4,19 µm et du CO à 4,50 µm – 4,60 µm lors d'une déflagration d'un mélange H₂/O₂/CO₂/N₂. Presented at the Congrès Français de Thermique SFT 2019, Nantes.
- Delerce S, Oelkers ÉH. 2022. Le potentiel du stockage géologique du CO₂ par minéralisation. *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, **105**(1): 57–62. DOI: <https://doi.org/10.3917/re1.105.0057>
- Dogniaux M. 2021. Suivi de la concentration atmosphérique de CO₂ par satellite : performances et sensibilités des prochains concepts d'observation dans le proche infrarouge. Thèse de Doctorat, Institut polytechnique de Paris, Paris, p. 282.
- Dossou B. 1992. Problématique et politique du bois énergie au Bénin. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, p. 375.
- FAO. 2009. *Situation des Forêts du Monde*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome.
- FAO. 2010. Evaluation des ressources forestières mondiales 2010 : Rapport principal. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome.
- Fink A. 2014. *Conducting Research Literature Reviews: from the Internet to Paper* (4th edn). Sage Publications : Thousand Oaks, California.
- Folahan SON, Dissou EF, Akouehou GS, Tente BAH, Boko M. 2018. Ecologie et structure des groupements végétaux des écosystèmes de la Lama au Sud-Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **12**(1): 322–340. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.26>
- García-Gutiérrez P. 2016. Carbon Capture and Utilisation processes: a techno-economic assessment of synthetic fuel production from CO₂. PhD Thesis, University of Sheffield, Royaume-Uni, p.318.
- GIEC. 2013. Résumé à l'intention des décideurs, changements climatiques 2013: Les Eléments Scientifiques.

- Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'Evaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Cambridge University Press : Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis d'Amérique; 204 p.
- Greiner O. 2021. Transition énergétique : comment la recherche de Total trace la route (vers la neutralité carbone). Presented at the Colloque Chimie et énergie nouvelles, EDP Sciences : Les Ulis ; 217–228.
- Guiot J. 2017. Limiter l'augmentation des températures bien en dessous de 2°C : est-ce un objectif atteignable ? *Revue Juridique de l'Environnement, spécial (HS17)* : 23-32. URL: <https://www.cairn.info/revue-juridique-de-l-environnement-2017-HS17-page-23.htm>
- Houevoganwa MC, Ouinsavi C, Goudegnon E, Gbemavo C, Sokpon N, Akpona S. 2014. Dynamique spatio-temporelle de la végétation et des simules vecteurs de l'onchocercose cécitante au Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **8**(4): 1669–1683. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i4.28>
- Issifou A, Tonouewa M, Biaou SS, Houehanou T, Idrissou Y. 2020. Technique de carbonisation du bois au Nord-Ouest du Bénin, Afrique de l'Ouest. *Afrique Science.*, **16**(2): 49–58. DOI: <http://www.afriquescience.net/PDF/16/2/5.pdf>
- Jeong-Potter C, Abdallah M, Kota S, Farrauto R. 2022. Enhancing the CO₂ Adsorption Capacity of γ -Al₂O₃ Supported Alkali and Alkaline-Earth Metals: Impacts of Dual Function Material (DFM) Preparation Methods. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **61**(29): 10474–10482. DOI : <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00364>
- Joseph V, Biaou FC. 2017. Production du charbon de bois au Bénin : menace ou opportunité pour l'adoption des mesures au changement climatique ? *Cahiers du Centre Béninois de la Recherche Scientifique et de l'Innovation*, **11**(1): 50–70. URL : <https://docplayer.fr/amp/216302557>
- Jung S, Park YK, Kwon EE. 2019. Strategic use of biochar for CO₂ capture and sequestration. *Journal of CO₂ Utilization.*, **32**: 128–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.04.012>
- Kabbej S, Tasse J. 2021. De Rio à Glasgow : L'évolution de la coopération internationale face aux changements climatiques. *Revue Internationale et Stratégique*, **123**(3): 107–117. <https://www.cairn-int.info/journal-revue-internationale-et-strategique-2021-3-page-107.htm>
- Kammen D, Lew D. 2005. Review of Technologies for the Production and Use of Charcoal. Renew. Approp. Energy Lab. Rep. Energy Resour. Group Goldman Sch. Public Policy. <http://www.hedon.info/docs/Kammen-Lew-Charcoal-2005.pdf>
- Kaur B, Gupta RK, Bhunia H. 2019. Chemically activated nanoporous carbon adsorbents from waste plastic for CO₂ capture: Breakthrough adsorption study. *Microporous and Mesoporous Materials*, **282**: 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.03.025>
- Keshavarz L, Ghaani MR, MacElroy JMD, English NJ. 2021. A Comprehensive Review on the Application of Aerogels in CO₂-adsorption: Materials and Characterisation. *Chemical Engineering Journal.*, **412**: 128604. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128604>
- Kombate B, Dourma M, Fousseni F, Woegan A, Wala K, Koffi A. 2019. Structure et potentiel de séquestration de carbone des formations boisées du Plateau Akposso en zone sub-humide au Togo. *Afrique Science*, **15**(2): 70–79. <https://fr.readkong.com/page/70-structure-et-potentiel-de-sequestration-de-carbone-7087107>

- Kouassi JK, Kouassi HK, Kouassi HR. 2018. Evaluation de la diversité floristique et estimation du taux de séquestration de carbone des arbres en alignement de voies de la commune de Daloa (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **12**(4): 1876–1886. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i4.28>
- LIFAD. 1999. Evolution des ressources forestières, exploitation des terres et diagnostic des consommations et des approvisionnements des grands centres urbains en énergies traditionnelles. Rapport d'expertise. RPTES BENIN. 104pp.
- Lourtioz JM, Lecomte J, Szopa S. 2022. *Enjeux de la Transition Ecologique : Enseigner la Transition Ecologique aux Etudiants de Licence à l'Université*. EDP Sciences : Les Ulis. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2662-9>
- Manlay R, Freschet GT, Abbadie L, Barbier B, Chotte JL, Feller C, Leroy M, Serpantié G. 2020. Sequestration du carbone et usage durable des savanes ouest-africaines : synergie ou antagonisme ? In *Carbone Des Sols En Afrique. Impacts Des Usages Des Sols et Des Pratiques Agricoles*, Chevallier T (Ed.), Razafimbelo T, Chapuis-Lardy L, Brossard M (Eds). IRD ; FAO : Marseille ; 241–254.
- Mayer M, Prescott C, Abaker WEA, Augusto L, Cecillon LL, Ferreira GWD, James J, Jandl R, Katzensteiner K, Laclau J-P, Laganière J, Nouvellon Y, Paré D, Stanturf JA, Vanguelova EI, Vesterdal L. 2020. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, **466**: 118127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Mderssa MEL, Malki F, Ikraoun H, Nassiri L, Ibjibijen J. 2022. Détermination des paramètres d'évaluation du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers (Cedrus atlantica Manetti, cèdre de l'Atlas au Maroc) : méthodes spécifiques et génériques. *Bois & Forêts des Tropiques*, **351** : 67–77. DOI : <https://doi.org/10.19182/bft2022.351.a36330>
- Michaud M. 2019. Contacteur membranaire innovant pour la cristallisation : Application aux systèmes de type diffusion / réaction. Thèse de doctorat, Université de Lyon, Lyon, p. 224.
- Midilli A, Ay M, Dincer I, Rosen MA. 2005. On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **9**(3): 255–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.003>
- Nair P, Nair V, Mohan Kumar B, Showalter J. 2010. Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. *Advances in Agronomy.*, **108**: 237–307. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Nambiema A, Fouquet J, Guilloteau J, Descatha A 2021. La revue systématique et autres types de revue de la littérature : qu'est-ce que c'est, quand, comment, pourquoi ? *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, **82**(5) : 553-554. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.admp.2021.03.004>
- Nogues M, Husson M, Paul G, Reynders S, Soussana J-F. 2021. Cadrage de modèles d'affaires possibles pour la mise en œuvre d'un démonstrateur carbone. Rapport ADEME. Convention n*18-03-C0034. DOI :10.15454/fc2z-7d70
- Py-Saragaglia V, Burri S, Fouedjeu L. 2019. Les forêts montagnardes du versant nord des Pyrénées. In *La Forêt Au Moyen Âge*. Bepoix S, Richard H (eds). Les Belles Lettres : Paris ; 276-299.
- Quinet A, Bueb J, Le Hir B, Mesqui B, Pommeret A, Combaud M. 2019. *La Valeur de l'Action pour le Climat*. France stratégie : Paris, France.

- Renald SA. 2021. Potentiel de séquestration de carbone dans le sol et la biomasse végétale d'un parc à résidus miniers amendés et reboisés. Thèse de Master, Université du Québec, Chicoutimi, p. 39.
- Robert M, Saugier B. 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, **335**(6): 577–595. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00094-4)
- Saradoum G, Temgoua FL, Mbaiakambeye MO, Tedou FBS, Behimnan A. 2022. Estimation du potentiel de séquestration de carbone des aires protégées : cas de la Forêt Classée de Djoli-Kera, Tchad. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*. DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.34658>
- Sokolov AV. 2020. Description Non-Markovienne de formes spectrales large-bandes : application au cas de diffusion Raman par N₂/CO₂ et lien avec la modélisation de l'atmosphère de Venus. Thèse de Doctorat, Université Bourgogne-Franche-Comté, France, p. 130.
- Tossou M. 1993. Contribution des reboisements villageois à la résolution des problèmes de pénurie de bois-énergie: Cas du projet Plantations de bois de feu dans le sud Bénin. Mémoire de DESS, Université Paris XII, p. 83.
- Tsewoue MR, Tchamba M, Avana ML, Tanougong AD. 2020. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le Moungo, Région du Littoral, Cameroun : influence sur l'expansion des systèmes agroforestiers à base de bananiers. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **14**(2): 486–500. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i2.15>
- Tyano A, Yelemou B, Mipro Mh, Koala J. 2019. Evaluation du stock de carbone aérien de *Piliostigma reticulatum* en zone soudanienne du Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences*, **144**: 14784–14800. DOI: <https://doi.org/10.35759/JABs.v144.7>