



L'évapotranspiration des forêts tropicales serait-elle une grande oubliée du débat climatique ?

Philippe Charlez, Pierre Coindreau & Laurent Guyot Sionnest, Experts de l'Institut Sapiens, Observatoire Energie et Climat

3 janvier 2025

Résumé exécutif

Dans un ouvrage collectif publié début 2024, l'Institut Sapiens a montré que l'évolution défavorable des émissions des pays émergents rendait intenable l'échéance de neutralité carbone à l'horizon 2050 et ce, quels que soient les efforts de décarbonation des pays de l'OCDE. Aussi, l'Institut recommandait un rééquilibrage significatif des investissements entre adaptation et atténuation.

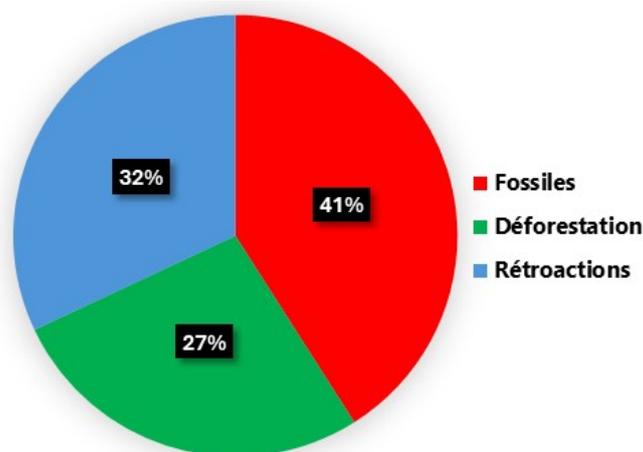
Des évènements récents passés inaperçus viennent renforcer ce constat. Dans un article daté de mars 2024, le climatologue Gavin Schmidt considère que l'augmentation de température exceptionnelle de 0,2°C observée en 2023 ne peut s'expliquer par la seule croissance des gaz à effet de serre. Le fait que l'observation ne colle pas avec la théorie interroge et amène à se poser une question légitime : d'autres phénomènes anthropiques pourraient-ils venir se superposer au carbone, peut-être un peu trop considéré aujourd'hui comme seule et unique cause de réchauffement ?

Nous avons dans la présente étude exploré une autre piste : l'influence de la déforestation sur la perte d'une part grandissante d'évapotranspiration des forêts tropicales.

Si les végétaux absorbent de l'eau par leurs racines, ils en rejettent aussi par leurs feuilles. Comme la transpiration du corps humain, l'évapotranspiration des végétaux a un effet refroidissant significatif sur le climat. Or, si la déforestation est bien prise en compte comme source qui contribue à l'augmentation du CO₂ par déficit de captage (elle compte environ pour 10% des émissions mondiales), de façon étonnante, l'évapotranspiration ne semble pas vraiment considérée comme régulateur majeur du climat.

Le calcul montre pourtant que la réduction de la surface globale de forêt tropicale a contribué entre 1960 et 2021 (perte de surface forestière de l'ordre de 5 millions de km²) à une augmentation de température de 0,27°C se décomposant en 0,04°C d'effet de serre et 0,23°C d'évapotranspiration. Durant la même période, l'accroissement de température résultant de la combustion des énergies fossiles a été de 0,41°C. Le complément par rapport au réchauffement global estimé à 1°C depuis 1960 résulte selon le GIEC de rétroactions climatiques, liées principalement à la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère, ainsi qu'à la diminution du pouvoir réfléchissant de la surface du globe terrestre ou des nuages (albédo) et à la diminution de la capacité d'absorption du CO₂ par les océans quand leur température augmente.

La partie rétroactive étant la conséquence des deux autres causes (fossiles et déforestation), la partition générale montre que le réchauffement dû à la déforestation (40%) serait du même ordre de grandeur que celui lié aux énergies fossiles (60%). Ce résultat inattendu questionne quant à la pertinence des politiques publiques européennes et européennes, exclusivement orientées vers la sortie des énergies fossiles et la décarbonation de la société.



Partition des principales causes du réchauffement

Si, comme l'Institut Sapiens l'avait démontré dans son dernier rapport, les pays de l'OCDE n'ont qu'un impact très limité sur la réduction des émissions mondiales, ils n'ont aucune prise physique sur la déforestation des forêts tropicales qui se déroule exclusivement au sein des pays émergents.

Lutter « à distance » contre la déforestation demanderait de mettre en œuvre des mesures coercitives contre les exportations venant des pays tiers en cours de déforestation, soit en interdisant certains produits, soit en imposant une taxe à l'importation sur ces mêmes produits. Selon de récentes études, seulement 25% de la déforestation mondiale seraient associés au commerce international, le reste découlant des consommations domestiques des pays forestiers. Les importations de l'UE représentant 16% de ces échanges internationaux, son poids effectif se réduit à seulement 4%. Aussi, l'embargo sur certains produits risque d'être sans effet, réorientant simplement les flux commerciaux vers d'autres marchés.

Les leviers à la disposition de l'Europe pour influencer sur la déforestation sont donc très limités. La seule solution serait de constituer un fonds mondial d'indemnisation incitant les producteurs à cesser le développement des cultures intensives de soja ou autres palmiers, grands responsables de la déforestation.

Introduction

Le réchauffement climatique et les mesures compensatoires pour en atténuer les causes occupent une part croissante dans le débat public. Presqu'exclusivement axées sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), ces mesures compensatoires structurent nos politiques environnementales et énergétiques.

Les enjeux économiques et sociétaux qui en résultent sont immenses. L'objectif « *net zéro carbone* » 2050, décrété lors de la COP21 de Paris en 2015 et adoubé par le Green Deal européen, implique des investissements vertigineux. Ainsi, pour satisfaire ces ambitions (i.e. réduire à l'horizon 2030 les émissions de GES de 55% par rapport à 1990), le Rapport Pisani-Ferry¹, publié en juin 2023, estime que la France devra investir annuellement 66 milliards d'euros supplémentaires par rapport au budget actuel climat/transition énergétique déjà de l'ordre de 100 milliards (investissements privés + fonds publics). Un coût difficilement supportable pour une économie en faible croissance endettée² ce jour à hauteur de 3 230 Md€. Dans une conjoncture où la baisse de la dépense publique est devenue un impératif majeur pour la France, il est donc indispensable de s'assurer de la meilleure allocation des ressources affectées dans le futur à la transition écologique.

Dans la mesure où les GES sont majoritairement produits par la combustion de ressources fossiles et représentent toujours 82% du mix énergétique primaire mondial, la réduction rapide de ces émissions s'avère particulièrement complexe à mettre en œuvre. Malgré une très forte croissance depuis une quinzaine d'années, les énergies renouvelables électriques (éolien et solaire pour l'essentiel) ne couvraient en 2023³ que 7,5% du mix primaire mondial. Même si leur apport est indispensable, leur coût global encore élevé, leur empreinte au sol très supérieure à celle des énergies conventionnelles et surtout leurs intermittences, n'en font pas des solutions économiquement et socialement optimales, ou en tout cas suffisantes, pour remplacer les énergies fossiles par de l'électricité bas carbone .

Dans un ouvrage collectif publié début 2024⁴, l'Institut Sapiens a montré que malgré des mesures d'économies et d'efficacité énergétique draconiennes, notre pays ne pourra se passer entièrement des énergies fossiles à l'horizon 2050. Maintenir une croissance minimale et réindustrialiser le pays, pour préserver notre économie et notre cohésion sociale, demanderont une quantité résiduelle de fossiles (surtout du gaz naturel) de l'ordre de 20%. Mais ce n'est là que l'arbre qui cache la forêt !

¹ https://www.vie-publique.fr/files/rapport/pdf/289488_1.pdf

² <https://www.insee.fr/fr/statistiques/8210074>

³ Source des données : Energy Institute

⁴ <https://www.institutsapiens.fr/wp-content/uploads/2024/05/Manuscrit-La-transition-energetique-est-elle-soutenable-.pdf>

Au niveau mondial, les émissions de GES des pays émergents continuent d'augmenter à un rythme soutenu. Ainsi, en 2023, elles se sont accrues de 6% en Chine et de 14% en Inde⁵. En 2050, les pays émergents représenteront 90% des émissions globales. Ces pays à faible niveau vie cherchent prioritairement à améliorer les conditions de vie de leurs populations en forte croissance. Il n'est pas réaliste de penser qu'ils accepteront de suivre la discipline contraignante en vigueur dans les pays de l'OCDE et de prioriser leurs investissements vers l'atténuation des GES. Ils n'en ont d'ailleurs pas les moyens. Les gaz GES « *ignorant les frontières* », les efforts substantiels des pays riches risquent de s'avérer inefficaces.

L'évolution prévisible des émissions des pays émergents rend aujourd'hui intenable l'échéance de neutralité carbone à l'horizon 2050 et l'objectif des 1,5°C gravés dans l'Accord de Paris. Compte tenu de la trajectoire la plus probable (accroissement de température de 2,7°C à l'horizon 2100), l'adaptation doit en conséquence revêtir le même degré de priorité que l'atténuation (i.e. réduction des émissions de GES). Aussi, l'Institut Sapiens a-t-il fortement recommandé un rééquilibrage des investissements entre adaptation et atténuation. Car, contrairement à l'atténuation, qui pour être efficace se doit d'être mondiale, l'adaptation est territoriale et peut donc se réaliser indépendamment de la volonté des autres. D'autant que des événements récents passés inaperçus pourraient rebattre certaines cartes.

Prenons-nous en compte tous les phénomènes ?

Dans un article publié en mars 2024 dans la revue Nature⁶ et largement passé inaperçu, le climatologue Gavin Schmidt du Goddard Institute for Space Studies (GISS, émanation de la NASA) considère que l'augmentation de température exceptionnelle de 0,2°C observée en 2023 ne peut s'expliquer par la seule croissance des GES. Par ailleurs, aucun des phénomènes naturels influençant le climat à court/moyen terme (cycles solaires, phénomènes El Niño, volcanisme, réduction des émissions d'aérosols) ni aucune combinaison de ces phénomènes ne semblent pouvoir justifier selon lui une telle augmentation sur un laps de temps aussi court. Sa conclusion est sans appel : « *Nous avons besoin de réponses pour savoir pourquoi 2023 s'est avérée être l'année la plus chaude des 100 000 dernières années* ». Au regard de cette anomalie, il est légitime de se demander si d'autres phénomènes anthropiques pourraient venir se superposer au carbone, considéré aujourd'hui comme seule et unique cause du réchauffement.

⁵ Source des données : Energy Institute

⁶ <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00816-z>

Dans un ouvrage publié en 2023⁷ l'ingénieur Michel Vieillefosse, pionnier des mesures de l'atmosphère par satellite, explore de nouvelles pistes, notamment les modifications par l'homme de la surface terrestre, comme l'urbanisation et la déforestation.

Michel Vieillefosse connaît bien notre planète et l'atmosphère qui l'entoure. Ingénieur au CNES, il fit partie des pionniers ayant contribué à l'établissement des premiers bilans radiatifs de la Terre et de ses variations thermiques. Son livre est dense et assez technique et livre une vision du fonctionnement de la machine climatique très différente de celle couramment admise. Vision que seule une lecture complète de l'ouvrage permet d'appréhender. Cet article ne prétend donc pas en faire une quelconque forme de recension mais se focalise sur deux aspects qui nous ont paru les plus significatifs : l'influence prépondérante de l'eau sous toutes ses formes sur le fonctionnement du climat et le réchauffement induit par les modifications de la nature des sols, causées par l'homme du fait de l'urbanisation et de la déforestation.

En particulier, nous raisonnons en augmentation de température moyenne, sans traiter dans cet article de l'hétérogénéité de la hausse des températures sur le globe, qui varie localement, selon M Vieillefosse, d'un facteur d'un à douze selon les régions, alors que le CO2 est répandu de manière uniforme sur le globe.

M Vieillefosse nous livre d'abord une vision d'astronaute de notre planète : « *l'œil, de l'espace, est frappé par l'énorme volume d'eau des océans et la très faible épaisseur de l'atmosphère* », écrit-il. Vue de l'espace, notre « *planète bleue* » (et non verte - **Figure 1**) suggère que le principal régulateur du climat est l'imposante masse d'eau constituant les océans. Une masse dont la capacité calorifique est 1000 fois supérieure à celle de l'atmosphère qui, en revanche, apparaît comme une fine pellicule de gaz accumulant des quantités de chaleur peu significatives. Ce n'est pas un hasard si le climat maritime est peu variable !



Figure 1 - La « planète bleue » vue de l'espace

⁷ Michel Vieillefosse (2023) « Réchauffement climatique. Une affaire entre la nature et l'Homme » Editions L'Harmattan

Si l'eau est de loin la plus abondante dans les océans (ainsi que dans les glaciers et les rivières qui complètent le cycle de l'eau), elle est aussi bien présente dans l'atmosphère sous forme de nuages et de vapeur d'eau. Avec une teneur comprise entre 0,5% et 4% suivant la latitude, la vapeur d'eau est le gaz à effet de serre de loin le plus abondant et le plus puissant. Le réchauffement climatique a d'ailleurs un effet majeur sur la vapeur d'eau dont la teneur dans l'atmosphère s'est accrue de 7% depuis le début le milieu des années 1970 (**Figure 2**).

Si la vapeur d'eau agit comme gaz à effet de serre en captant puis en réémettant des rayonnements infrarouges (nous savons tous que les matins sont plus frais après une nuit sans nuages !), elle refroidit aussi l'atmosphère via plusieurs mécanismes. D'une part, en s'évaporant au niveau de la surface terrestre, la vapeur d'eau produit du froid en absorbant la chaleur environnante⁸. Plus légère que l'air, elle s'élève sous l'effet de puissants mouvements convectifs vers les hautes couches de l'atmosphère. En se refroidissant, elle se condense et forme des nuages qui réfléchissent les rayonnements solaires et retomberont sur terre sous forme de pluie⁹. Quant à la chaleur rejetée dans la haute atmosphère lors de la condensation¹⁰, elle est renvoyée vers l'espace sous forme de rayonnement. Les mouvements ne sont pas que verticaux : poussée par les vents, la vapeur d'eau transporte aussi son énergie et son humidité sur toute la surface du globe.

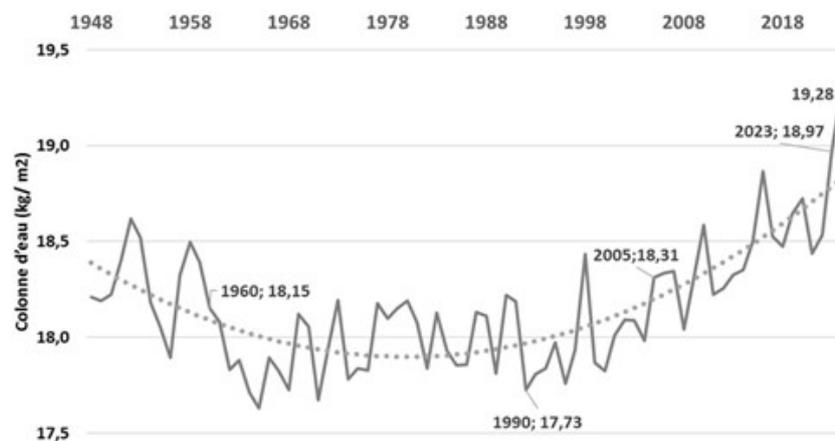


Figure 2 – Colonne d'eau précipitable depuis la fin des années 1940

Source des données : NOAA mise en forme par M. Vieillefosse

⁸ La vaporisation est une réaction endothermique (elle puise de la chaleur dans le milieu extérieur)

⁹ Le rôle exact des nuages, tantôt réchauffant tantôt refroidissant et quasiment impossible à modéliser, est un des sujets les plus débattus sur le fonctionnement du climat.

¹⁰ La condensation est une réaction exothermique (elle rejette de la chaleur dans le milieu extérieur)

Michel Vieillefosse s'est aussi intéressé aux « îlots de chaleur » présents autour des zones fortement urbanisées. Par rapport à la croissance moyenne de la température du globe (1°C depuis le début des années 1960), les écarts de température observés dans certains de ces îlots peuvent atteindre plusieurs degrés. Phénomène bien connu et de grande amplitude, la surchauffe des zones urbaines a fait l'objet de nombreuses études (végétalisation, choix des matériaux et des couleurs). Très limités géographiquement (la surface urbanisée ne représente que 1,5% des terres émergées¹¹) ces îlots ont-ils pour autant un impact sur le réchauffement global ?

Enfin, et, pour nous c'est le point le plus important, Michel Vieillefosse **attire notre attention sur l'importance de la perte d'évapotranspiration liée à la déforestation et dont l'impact sur la température globale peut être aisément calculé.** Quel est son ordre de grandeur par rapport au réchauffement lié aux gaz à effet de serre ? C'est sur cet aspect que porte l'essentiel de l'analyse effectuée par l'Institut Sapiens

L'évapotranspiration des végétaux

Au-dessus des grandes forêts vient se rajouter à l'évaporation classique un phénomène supplémentaire : l'évapotranspiration de la couverture végétale (**Figure 3**)¹².

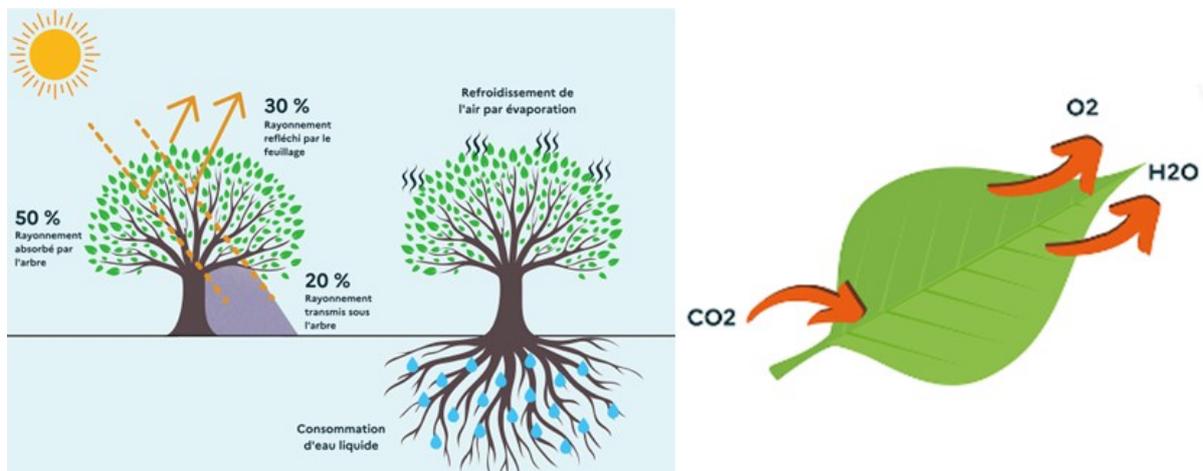


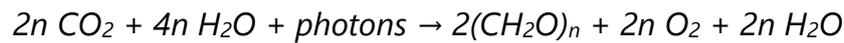
Figure 3 – Phénomène d'évapotranspiration
Source : office national des forêts

L'évapotranspiration des plantes est un processus qui s'inscrit en filigrane de la photosynthèse. Les végétaux synthétisent leur nourriture sous forme de sucres à partir d'eau, de CO₂ et d'énergie solaire puis rejettent de l'oxygène et « *transparent* » la moitié de l'eau initialement absorbée par les racines :

¹¹

<https://www.bing.com/search?q=surface+urbanisée+pourcentage+de+la+surface+terrestre&form=ANSPH1&refig=e6c52244cfdb4c9da3b309201a8343c1&pc=ACTS>

¹² <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+//14a1::le-pouvoir-des-arbres-levapotranspiration.html>



Cette transpiration s'effectue à travers de minuscules ouvertures rétractables (les stomates) présentes dans les feuilles. Comme les pores de la peau humaine, les stomates s'ouvrent ou se ferment pour réguler la teneur en eau du végétal. Comme la transpiration du corps humain régule sa température, l'évapotranspiration a un effet refroidissant sur le climat. C'est pour cela qu'en cas de canicule il fait toujours beaucoup plus frais dans la « *verte périphérie* » des villes. C'est aussi pour cette raison que la végétalisation est un moyen efficace de lutter contre la « *surchauffe* » des zones urbaines¹³.

Si l'intensité de l'évapotranspiration est fonction du type d'arbre (un chêne rejette en moyenne 1000 litres/jour contre seulement 75 litres pour un bouleau¹⁴), elle dépend aussi de la latitude. De façon logique, les arbres transpirent abondamment aux latitudes chaudes et humides ce qui induit un effet refroidissant conséquent. Au fur et à mesure que l'on remonte vers les latitudes tempérées l'effet s'atténue puis s'inverse (effet réchauffant) dans les forêts boréales (au-delà de 50° de latitude).

L'évapotranspiration d'un bassin peut être calculée par différentes formules empiriques dont la plus connue est celle de TURC¹⁵ telle que :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left[\frac{P}{L}\right]^2}}$$

Où ETR est l'évapotranspiration annuelle exprimée en mm de hauteur d'eau, P est le niveau de précipitation annuel exprimé en mm d'eau et L une constante dépendante de la température moyenne annuelle T (exprimée en °C) représentant le pouvoir évaporant de l'atmosphère) telle que :

$$L = 300 + 25 * T + 0,05 * T^3$$

En supposant une pluviométrie de 2,5 m et une température de 25° C (conditions moyennes annuelles des forêts tropicales¹⁶) on trouve une évapotranspiration de l'ordre de 1,45 m. Nous retiendrons dans la suite la valeur de 1,5 mètre par an.

¹³ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/quels-leviers-favoriser-evapotranspiration-rafraichir-climat>

¹⁴ <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+ /14a1::le-pouvoir-des-arbres-levapotranspiration.html>

¹⁵ https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/rihani_abla/files/m1_hydro_evaporation_et_bilan_hydrique.pdf

¹⁶ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Amazonie>

Données quantitatives sur la déforestation mondiale

En 2021, la surface forestière mondiale était de **40 millions de km²** dont les deux tiers (environ 26 millions) se situent dans 10 pays (**Figure 4- gauche**).

Le top 5 est : Russie (20% de la surface forestière mondiale), Brésil (12%), Canada (9%), US (8%) et Chine (5%). Les forêts des régions tempérées et boréales occupent un peu plus de 23 millions de km² contre 17 millions pour les forêts tropicales et subtropicales (**Figure 4- droite**) dont plus de la moitié se situe en Amérique du Sud contre 35% en Afrique équatoriale et 12% dans le Sud-Est Asiatique.

Pays	2021		Contrée	Surface	Déforestation
	MMkm ²	%		millions km ²	milliers km ²
Russie	8,15	20%	Amérique sud & centrale	9,0	-904
Brésil	4,95	12%			
Canada	3,47	9%			
US	3,10	8%			
Chine	2,22	5%			
Australie	1,34	3%	Afrique	6,0	-853
RDC	1,25	3%			
Indonésie	0,92	2%	Sud est asiatique	2,1	-214
Inde	0,72	2%			
Total	26,12	65%	Tempérées et boréales	23,2	855
			Total	40,3	-1117

**Figure 4 – Top 10 de la surface forestière en 2021
Déforestation entre 2000 et 2021**

Source des données : Banque Mondiale

Selon la Banque Mondiale (**Figure 4- droite**) depuis le début du siècle les forêts tropicales et subtropicales ont été amputées de près de 2 millions de km² (**Figure 4- droite**) soit 13 fois la surface forestière de l'Hexagone¹⁷.

¹⁷ La surface forestière actuelle de la France est de l'ordre de 16 millions d'hectares

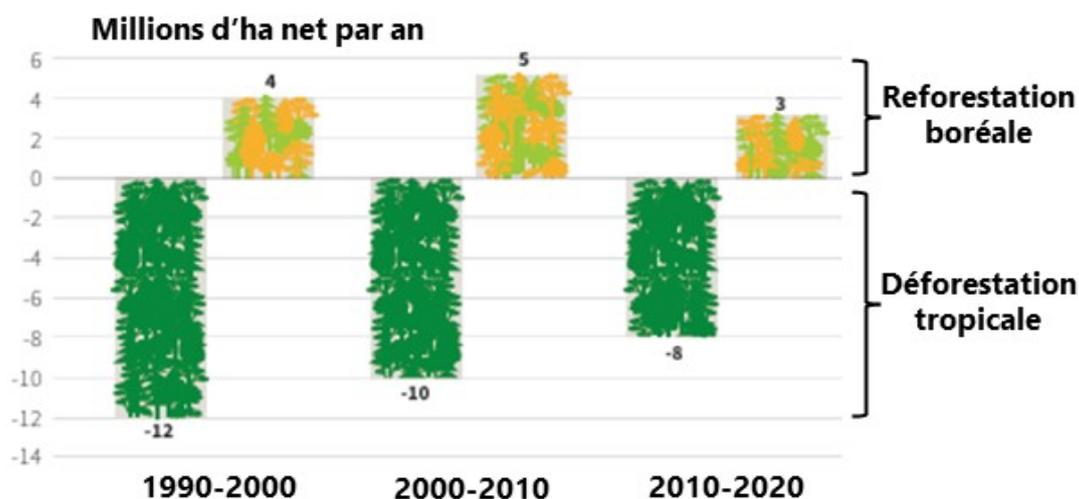


Figure 5 – Déforestation annuelle moyenne depuis 1990
Source des données : Food & Agriculture Organisation

Des valeurs en accord avec le dernier rapport¹⁸ de la FAO (Food & Agriculture Organisation, dépendant des Nations Unies) qui fait état de 1,8 millions d’hectares de déforestation nette¹⁹ durant la même période et de 3 millions depuis 1990 (4,2 millions de déforestation brute). Le rythme de déforestation des forêts tropicales est toutefois en forte baisse. Il est

Figure 5 passé de -12 Mha/an durant les années 1990 à -8 Mha/an depuis 2010. En revanche, les forêts des contrées tempérées et boréales se sont accrues de près d’un million de km². Des résultats qui vont l’un et l’autre dans le sens du réchauffement dans la mesure où, comme nous l’avons déjà précisé, seules les forêts tropicales sont « refroidissantes ».

Bien que la FAO produise des rapports périodiques en accès libre depuis 1948²⁰, les données antérieures à 1990 sont plus difficilement interprétables. Les premiers inventaires²¹ ne couvrant pas l’ensemble des pays, les chiffres de l’époque minimisent la réalité. Ainsi l’inventaire de 1958²² (**Figure 6**) fait état de 44 millions de km² mais ne couvre que 88% de l’ensemble des pays. La valeur de l’époque devait donc se situer autour de **45 millions de km²** contre, rappelons-le, 40 millions de km² aujourd’hui. Nous retiendrons donc, dans nos calculs, l’ordre de grandeur de **5 millions de km² de déforestation depuis le début des années 1960**, une valeur cohérente avec les données de la FAO ci-dessus (3 millions depuis 1990).

¹⁸<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c72bd4f6-bd63-47d0-b513-f90d47756f2a/content>

¹⁹ La déforestation nette prend en compte la régénérescence naturelle (notamment après des incendies). Elle est donc inférieure à la déforestation brute.

²⁰<https://www.fao.org/forest-resources-assessment/past-assessments/world-forest-inventory-1958/fr/>

²¹ Les inventaires de l’époque ne disposaient pas de mesures satellites

²² <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c79a0ba0-b6e0-4c4d-a8b3-94f29ec6aac2/content>

Region	Total
	<i>Million hectares</i>
Europe	141
U.S.S.R.	1 131
North America . .	733
Central America .	74
South America . .	957
Africa	753
Asia	520
Pacific Area . . .	96
Total	4 405

Figure 6 – Surface forestière (en milliards ha) en 1963
Source des données : Food & Agriculture Organisation

La déforestation a deux influences majeures sur le climat qui se lisent en filigrane de la réaction de photosynthèse :

- ✓ Le captage de CO₂ dans le premier membre. La déforestation contribue à l'accroissement des GES par déficit de captage (diminution du puits de carbone).
- ✓ L'évapotranspiration par rejet d'H₂O dans le second membre. La déforestation réduisant l'évapotranspiration réchauffe mécaniquement le climat.

Les deux phénomènes sont analysés dans les paragraphes suivants.

Impact de la déforestation sur les émissions de CO₂

La déforestation est considérée aujourd'hui, après la combustion des énergies fossiles, l'agriculture et l'industrie,²³ comme la quatrième source d'accroissement des GES²⁴. Elle est référencée au niveau mondial sous la terminologie **UTCATF**²⁵ (**U**tilisation des **T**erres, **C**hangement d'**A**ffectation des **T**erres et **F**oresterie).

La végétation étant, via la photosynthèse, un puissant absorbeur de CO₂, toute réduction de la surface forestière réduit la taille de ce puits de carbone et accroît donc mécaniquement l'augmentation du CO₂ causées par les émissions. Par ailleurs, la déforestation génère des quantités pharaoniques de déchets végétaux qui, en se bio-dégradant, rejettent du CO₂ et du méthane dans l'atmosphère. Enfin, l'accroissement des feux de forêt est une boucle de rétroaction engendrée par le réchauffement

²³ Les émissions industrielles sont principalement liées à la fabrication du ciment (transformation de calcaire en chaux)

²⁴ <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quels-sont-les-principaux-gaz-effet-de-serre>

²⁵ <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use--land-use-change-and-forestry-lulucf>

climatique. En cumulant ces différentes sources, on estime que la déforestation est responsable annuellement de 5 milliards de tonnes de CO₂ équivalent²⁶ soit 10% des émissions mondiales (**Figure 7**).

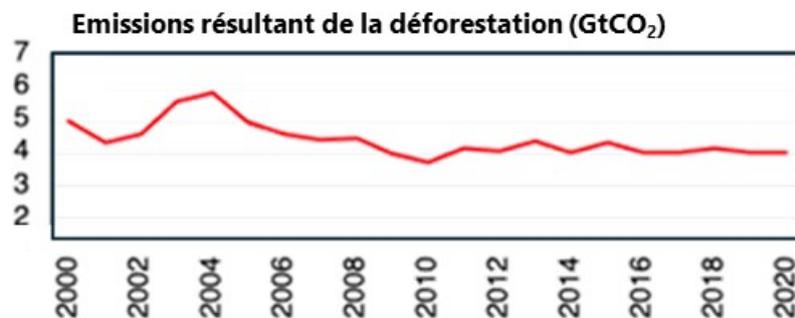


Figure 7 – Historique des émissions liées à la déforestation
Source des données : Earth Science data

Impact de la déforestation sur l'évapotranspiration

De façon étonnante, l'évapotranspiration n'est en revanche pratiquement jamais considérée comme régulateur du climat. Ainsi, les sites de Greenpeace²⁷ et de WWF²⁸, deux des ONGs environnementales les plus représentatives, parlent abondamment sur leurs sites respectifs des « *écosystèmes forestiers capteurs de carbone* » de « *déforestation générant chaque année des milliards de tonnes de CO₂* » « *de perte significative de diversité* » mais semblent totalement ignorer l'évapotranspiration. Le résumé pour décideurs du sixième rapport du GIEC, publié en 2021²⁹, mentionne l'évapotranspiration à plusieurs reprises, mais l'envisage avant tout comme **cause rétroactive de sécheresse**, le réchauffement (dû exclusivement au carbone) induisant « *un déficit de précipitations conjugué à un excès d'évapotranspiration* ».

L'évapotranspiration est aussi abondamment discutée dans le rapport spécial du GIEC Climate & Land³⁰. Son effet refroidissant est cette fois clairement mentionné « *le réchauffement sera atténué pendant la saison de croissance en raison d'une évapotranspiration plus importante (degré de confiance élevé). Dans les tropiques, partout où le changement climatique augmentera les précipitations, la croissance de la végétation et l'augmentation associée de l'évapotranspiration entraîneront un effet d'atténuation sur le réchauffement régional (degré de confiance moyen)* ». En résumé, si le GIEC mentionne bien l'évapotranspiration comme régulateur local voire régional, nous n'avons pas trouvé dans ses rapports de référence claire quant à l'impact du couple déforestation/évapotranspiration sur la température globale. Compte tenu des

²⁶ file:///C:/Users/Charl/Downloads/essd-2022-104.pdf

²⁷ <https://www.greenpeace.fr/deforestation-climat>.

²⁸ <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/comprendre-limpact-de-la-foret-sur-le-climat>

²⁹ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_French.pdf

³⁰ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_Technical-Summary.pdf

puissants mouvements convectifs horizontaux et verticaux pourquoi le refroidissement lié à l'évapotranspiration ne se répartirait-il pas sur l'ensemble de la surface du globe ?

Réduction de surface des forêts tropicales entre 1960 et 2021 : 5 millions km²

Évapotranspiration moyenne annuelle : 1,5 m³/m²

Volume total annuel évapo-transpiré : 7,5 10¹² m³

Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 20°C : 2,454 GJ/m³

Énergie endothermique d'évapotranspiration : 1,84 10²² J

Surface de la terre : 510 10¹²m²

Nombre de secondes dans l'année : 31,5 10⁶ s

Flux énergétique

$$\frac{1,8410^{22}J}{51010^{12}m^2 \times 31,510^6s} = 1,14 \frac{W}{m^2}$$

Refroidissement $R_{th}\Delta\phi$ où R_{th} est la résistance thermique de l'air

R_{th} de l'air humide est de l'ordre de 0,20 °K/W*m³¹

Réchauffement dû à la déforestation entre 1960 et 2021 = 0,23°C

Cette valeur inférieure à celle de Michel Vieillefosse (0,31 °C) est lié à un choix plus conservatif de la valeur d'évapotranspiration annuelle (1,5 m³/m² contre 2 m³/m²)

Le calcul simple repris dans l'encadré montre qu'entre 1960 et 2021 les 5 Mkm² de déforestation tropicale ont conduit à un réchauffement global de l'ordre de 0,23°C.

Pour mesurer l'énorme perte d'énergie de refroidissement du globe terrestre causée par la perte depuis 50 ans de 5 km² de forêt tropicale, il suffit de rapprocher la perte annuelle d'énergie endothermique d'évapotranspiration (18 400 Exajoules, environ 5 millions de TWh), de la consommation finale d'énergie au niveau mondial, soit 422 Exajoules (117 000 TWh).

En sacrifiant une part significative de ses forêts primaires, l'humanité a donc perdu un gigantesque « climatiseur végétal », d'une taille équivalente à 43 fois la consommation mondiale d'énergie, et source directe d'un réchauffement évalué à 0,23 °C.

Étonnamment évacuée du débat, l'évapotranspiration serait-elle une grande oubliée du réchauffement global ?

³¹ https://thermexcel.com/french/energie/Calcul_deperditions_thermiques_NF_EN_12831.htm

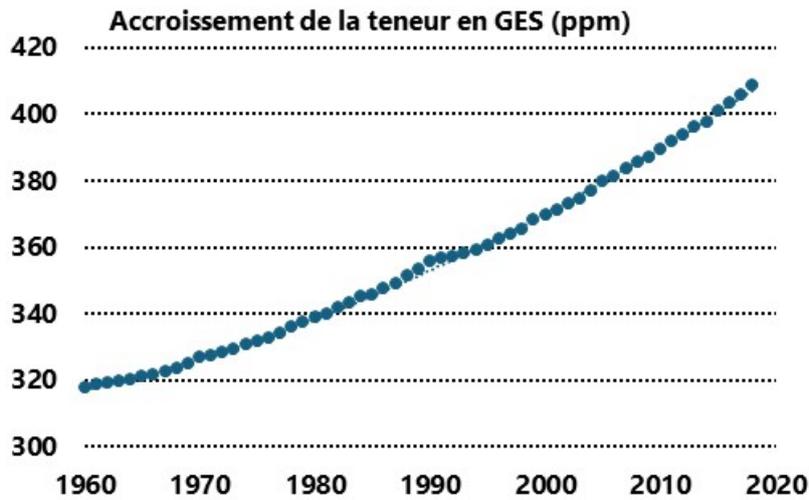


Figure 8 – Courbe de Keeling
Source des données : Mona Loa

Discussion

Depuis 1960, la teneur en GES dans l’atmosphère est passée de 318 ppm à 420 ppm (**Figure 8 – courbe de Keeling**). Durant cette même période, la déforestation a causé un accroissement de GES de 10 ppm tandis que la température globale s’est accrue de l’ordre de 1°C. La relation température/GES peut être approximée en couplant la réponse de Planck et la formule de Myhre (voir démonstration en Annexe I) :

$$\Delta T(^{\circ}C) = 1,605 \ln \frac{C(t)}{280}$$

Entre 1960 et aujourd’hui, l’accroissement de température global lié à la réponse de Planck est égal à

$$\Delta T_{GES}^1 = 1,605 \left[\ln \frac{420}{280} - \ln \frac{318}{280} \right] = 0,45^{\circ}C$$

Effectué hors déforestation (moins 10 ppm d’émissions actuelles, soit 410 ppm au lieu de 420 ppm), le même calcul donne

$$\Delta T_{GES}^2 = 1,605 \left[\ln \frac{410}{280} - \ln \frac{318}{280} \right] = 0,41^{\circ}C$$

L’accroissement des GES due à la déforestation a donc joué pour 0,04°C tandis que le reste (soit 0,41 %) est dû aux émissions des énergies fossiles.

Depuis 1960, l’effet total de la déforestation (GES + évapotranspiration) a donc contribué pour 0,27°C (0,23°C d’évapotranspiration + 0,04°C de carbone) contre 0,41°C pour les énergies fossiles. Le complément par rapport au réchauffement global (1°C)

est lié aux rétroactions climatiques dont la principale est l'accroissement de teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère (**Figure 2**).

La partie rétroaction étant la conséquence des deux autres causes primaires de réchauffement, la partition générale (**Figure 9**) montre que **la déforestation compte pour 40% du réchauffement contre 60% pour les énergies fossiles.**

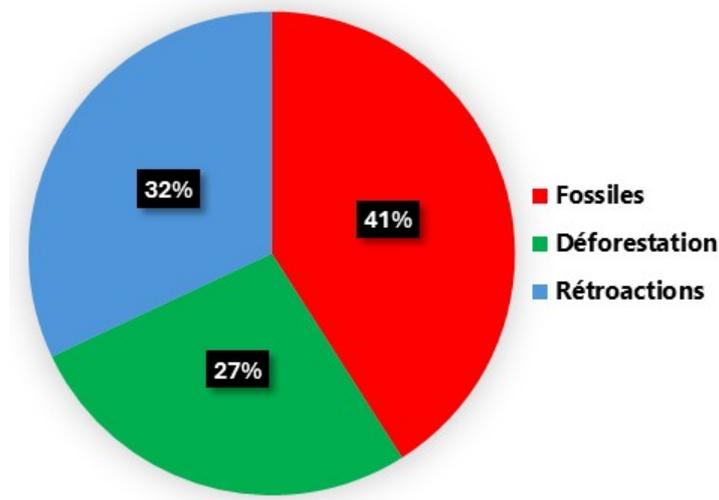


Figure 9 – Partition des principales causes du réchauffement

Ce résultat inattendu questionne une nouvelle fois quant à **la pertinence des politiques publiques européennes** exclusivement orientées vers la sortie des énergies fossiles et la décarbonation de la société mais aussi quant à l'impact réel de l'Europe sur le réchauffement global. En effet, si les pays de l'UE n'ont plus qu'un impact physique très limité (l'UE c'est moins de 10% des émissions mondiales !) sur la réduction des GES (part rouge de la **Figure 9**), ils n'en ont aucun sur la déforestation (part verte de la **Figure 9**) dont les leviers se situent exclusivement au sein des pays émergents.

Malgré l'évidence, les pouvoirs publics refusent pourtant de prendre en considération ces faits et continuent d'injecter des centaines de milliards d'euros dans une décarbonation européenne sans réel impact sur le climat. Ne possédant pas les leviers physiques de la décarbonation et encore moins ceux de la déforestation, les européens contrôlent en revanche le levier de l'importation. Une véritable « *lutte à distance* » est-elle pour autant possible et surtout efficace ?

La lutte à « *distance* »

Lutter « à *distance* » contre la déforestation repose sur deux leviers : soit des mesures **coercitives** consistant à interdire les importations de produits à base de bois tropicaux ou des produits agricoles responsables de la déforestation ou soit des mesures **incitatives** encourageant les agriculteurs à abandonner ces cultures, principalement le soja et l'huile de palme (ce qui nécessiterait de trouver des alternatives), concentrées sur un nombre restreint de pays (Indonésie, Brésil, Congo).

Le premier levier est celui choisi par l'UE dans sa récente législation RDUE « Règlement sur la Déforestation et la Dégradation des forêts » adopté en juin 2023³². Le RDUE vise à interdire la mise sur le marché ou l'exportation depuis le marché européen de produits ayant contribué à la déforestation après le 30 décembre 2020 comme le café, le cacao, le caoutchouc, l'huile de palme ou encore le soja.

Outre le fait que ces mesures coercitives pénaliseraient en premier lieu les producteurs, souvent de petite taille, qui se trouveraient ainsi privés de ressources vitales, cet embargo peut-il réellement s'avérer efficace si les grands pays émergents (Chine, Inde) n'adoptent pas des dispositions similaires ? Selon de récentes études, seulement 25% de la déforestation mondiale seraient associés au commerce international, le reste découlant des consommations domestiques des pays forestiers. Les importations de l'UE représentant 16% de ces échanges internationaux, son poids effectif sur la déforestation ($0,25 \times 0,16 = 0,04$) se réduit à seulement 4%. Aussi, l'application de la RDUE risque d'être sans effet, réorientant simplement les flux commerciaux vers d'autres marchés.

Reste le second levier qui est, en théorie au moins, à la portée des pays riches : la création d'un fonds mondial d'indemnisation incitant les producteurs à cesser le développement des cultures intensives responsables de la déforestation. Cette approche peut paraître utopique et nul doute qu'elle serait difficile à mettre en œuvre, mais les centaines de milliards d'euros investis dans une décarbonation européenne (et dans le reste des pays riches), sans réel impact sur le climat seraient sans doute mieux employés à abonder un tel fonds. Cette coopération internationale pourrait être mise en place à l'occasion d'une COP.

³² <https://www.deforestationimportee.ecologie.gouv.fr/reglement-europeen-contre-la-deforestation-et-la-degradation-des-forets/article/reglement-europeen-contre-la-deforestation-et-la-degradation-des-forets>

Démonstration de la formule de Myhre

Loi de Stefan

Un corps noir absorbe (et est capable de réémettre) intégralement les radiations qu'il reçoit et ce quelles que soient les longueurs d'onde. Le rayonnement global (aussi appelé « flux radiatif » et s'exprimant en W/m^2 de surface émettrice) ne dépend que de sa température :

$$\phi(T) = \sigma T^4$$

où σ est une constante égale à $5,6704010 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$. Cette relation très simple s'appelle « loi de Stefan ».

Loi empirique de Myhre

En compilant de nombreuses données satellitaires, Myhre³³ a montré qu'en première approximation, le forçage radiatif augmentait de façon logarithmique avec la concentration en CO_2 dans l'atmosphère :

$$e_s = 5,35 \ln \frac{C(t)}{C_0}$$

où $C(t)$ est la valeur de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère à l'instant t et C_0 la valeur à l'aube de la révolution industrielle (soit 280 ppm).

Combinaison des lois de Stefan et de Myhre

En présence de l'effet de serre ($e_s \approx 150 W/m^2$), l'équilibre radiatif de la terre s'écrit³⁴

$$e_s = e_0 + e_{es}$$

où e_0 ($\approx 240 W/m^2$) est le flux radiatif solaire corrigé de l'albédo. En posant $\tau_a = e_0 / e_s$ ($240/390 \approx 0,615$) et tenant compte de la loi de Stefan pour la Terre (avec effet de serre) $e_s = T_s^4$

$$e_s = \sigma T_s^4 (1 - \tau_a)$$

L'augmentation de forçage radiatif lié à l'accroissement des GES dans l'atmosphère se calcule en dérivant l'équation ci-dessus par rapport à T_s soit

$$d e_s = 4\sigma T_s^3 (1 - \tau_a) dT_s$$

³³ <https://www.semanticscholar.org/paper/New-estimates-of-radiative-forcing-due-to-well-Myhre-Highwood/9e006847e9b5c605a0b3a536508b03ecacd69722>

³⁴ https://www.college-de-france.fr/media/edouard-bard/UPL3577731297657308492_Sandrine_Bony_L_na.pdf

ou encore en variations

$$\Delta T_s = p \Delta C$$

avec

$$p = \frac{1}{4\sigma T_s^3(1 - \tau_a)}$$

où p est une constante appelée « *paramètre de réponse de Planck* ». En prenant $T_s = 288^\circ K$ et $\tau_a = 0,615$ on trouve $p = 0,3 m^2 K/W$. Combinant cette dernière équation avec celle de Myhre, on obtient une relation extrêmement simple reliant l'accroissement de température et la concentration en CO_2 dans l'atmosphère au temps t :

$$T_s(^{\circ}C) = 1,605 \ln \frac{C(t)}{280}$$

Cette dernière formule est très proche de celle utilisée par le GIEC³⁵ (AR3, Ch. 6.1 pp 358)

$$T_s(^{\circ}C) = \frac{5,35}{3,3} \ln \frac{C(t)}{280}$$

³⁵ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf