

Sobriété environnementale et évaluation du risque écologique soutenable

Emmanuel OKAMBA ¹

¹ Université Gustave Eiffel, de Paris Est, Marne La Vallée, emmanuel.okamba@univ-eiffel.fr

Résumé : Dans le cadre des stratégies de développement durable des organisations, l'évaluation de la dimension éthique du développement économique, conduit à mesurer leur responsabilité environnementale à partir des « empreintes » ou des coûts liés à la pression qu'elles exercent sur l'environnement pour satisfaire l'offre et la demande des ressources rares renouvelables. Le risque écologique soutenable représente le montant de cette pression nécessaire pour créer momentanément de la valeur. Il est écologiquement contre-productif lorsqu'il est structurel. Dans ce cas, la reconstitution des stocks de ressources renouvelables nécessite le rétablissement de la sobriété environnementale par des procédés bioénergétiques artificiels pour maîtriser les pollutions incompressibles par les moyens classiques.

Mots clés : Sobriété environnementale, risque écologique soutenable, empreinte carbone, empreinte écologique, biocapacité, photosynthèse artificielle

Environmental sobriety and sustainable ecological risk assessment

Abstract: Within the framework of organizations' sustainable development strategies, the evaluation of the ethical dimension of economic development leads to measuring their environmental responsibility based on the "footprints" or costs linked to the pressure they exert on the environment to meet the supply and demand of renewable scarce resources. The sustainable ecological risk represents the amount of this pressure necessary to momentarily create value. It is ecologically counterproductive when it is structural. In this case, the reconstitution of stocks of renewable resources requires the restoration of environmental sobriety by artificial bioenergetic processes to control pollution that cannot be reduced by conventional means.

Keywords: Environmental sobriety, sustainable ecological risk, carbon footprint, ecological footprint, biocapacity, artificial photosynthesis

*This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article.

Citation: Okamba, E. Sobriété environnementale et évaluation du risque écologique soutenable. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 39(X), XX-XX. <https://doi.org/10.53102/2025.39.xx.xx>

Historique : reçu le 12/07/2023, accepté le 13/01/2025, en ligne le 31/07/2025

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), permitting all non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des stratégies de développement durable des organisations, l'évaluation de la dimension éthique de la performance, a conduit à mesurer la responsabilité environnementale à partir des « empreintes » ou des coûts des pressions qu'elles exercent sur l'environnement pour satisfaire l'offre et la demande des ressources écologiques rares. Le risque écologique qui en résulte, est substantiel à la création de la valeur. Il désigne alors, la position écologique qui génère de la richesse sans compromettre les ressources naturelles rares renouvelables. Ce risque est contre-productif, lorsqu'il devient structurel ou permanent. Dans ce cas, la reconstitution des stocks de ressources rares renouvelables du sol et du sous-sol, nécessite le rétablissement de la sobriété environnementale par des procédés bioénergétiques artificiels que par les solutions fondées sur la nature (adaptation, atténuation, transversalité).

En effet, le triptyque des accords multilatéraux sur l'environnement issu du Sommet de Rio de 1992 englobe : la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification, la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et la Convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique, adopté à Paris en 1994 et ratifié par 196 États. Ces derniers se réunissent périodiquement, en trois Conférences des Parties (Cop) distinctes pour prendre des mesures nécessaires à la maîtrise des coûts des activités humaines dans ces trois composantes écologiques : désertification, changement climatique et destruction des écosystèmes naturels qui constituent les principaux domaines où l'homme a épuisé les ressources rares disponibles sur les neuf que comporte la terre (Rockstrom J, 2009).

Le risque climatique constitue la composante majeure de ces conférences, en ce sens que les risques liés au réchauffement climatique touchent très rapidement l'humanité toute entière, alors que ceux liés à la Désertification et à la destruction de la Diversité Biologique ne touchent que des zones spécifiques du globe. Le concept de sobriété

environnementale qui se définit comme la maîtrise de l'empreinte carbone et de l'empreinte écologique pour un développement écologiquement compatible ou résilient, permet d'analyser en vue de maîtriser, l'interaction entre ces risques.

Dans ce cadre, l'empreinte carbone mesure la sobriété énergétique ou le degré de maîtrise du risque climatique, alors que l'empreinte écologique mesure la sobriété écologique à travers le coût de l'épuisement des ressources rares de la planète lié à la Désertification et à la destruction des écosystèmes par les activités humaines. La première mesure est quantifiée en kilogrammes de dioxyde de carbone (CO₂) par la méthode cadastrale, consistant à comptabiliser les directes émissions produites sur un territoire, sans tenir compte des exportations et des importations. Progressivement, les émissions indirectes comme les pollutions liées au carburant des avions pour les vols internationaux ou celles des transports internationaux des bateaux ont été intégrées dans le calcul.

Quant à la deuxième mesure, elle comptabilise la pression exercée par les hommes sur les ressources naturelles rares renouvelables et les services écologiques fournis par la nature. Elle évalue le nombre de surfaces terrestres bioproductives nécessaires, pour produire les biens et services et absorber les déchets qui en découlent dont le carbone est une composante essentielle. Elle s'affine d'année en année en intégrant plusieurs paramètres directs et indirects comme les empreintes des terres cultivées, des pâturages, des terrains bâtis, des pêches, des chasses et autres. D'après le rapport *Planète vivante 2016* de (WWF, 2016) l'empreinte carbone représente plus de la moitié de l'empreinte écologique de l'ensemble de l'humanité depuis 1966. Comment peut-on mesurer le risque écologique soutenable pour maîtriser la surconsommation des ressources naturelles rares nécessaires à la création de la valeur ?

Si comme le définit l'ONG *Global Footprint Network* (Global, 2022), le terme « empreinte carbone » désigne la quantité de carbone émise par une activité, une personne, un groupe ou une organisation, par sa consommation en énergie et en

matières premières du sol et du sous-sol, la composante carbone de l'empreinte écologique traduit cette quantité en surface de forêt nécessaire pour séquestrer les émissions de dioxyde de carbone. Cette mesure permet de représenter la demande que les combustions de ressources fossiles exercent sur la planète. Elle aide à mieux analyser la pression humaine sur l'environnement, en partant de l'hypothèse écologique selon laquelle, la capacité de régénération de la terre est un facteur limitant pour l'économie humaine si elle continue à surexploiter la biocapacité ou le niveau de ressources que la biosphère est capable de renouveler.

Dans cette recherche exploratoire, nous nous appuyons sur une analyse factorielle des données extraites de la base des données de *Global Footprint Network (Global, 2022)* sur un échantillon de 188 pays entre 1961 et 2021, et celles produites dans le cadre du reporting extra financier environnemental de 13189 entreprises du monde par *Carbon Disclosure Project (Project, 2021)* pour mesurer et analyser les facteurs clés de succès qui influencent la création de la valeur par rapport à la position des ressources écologiques renouvelables. Cette position s'obtient par la différence entre la biocapacité et l'empreinte écologique d'une organisation. Une organisation sera dite « crédeur écologique » lorsque sa biocapacité est supérieure à son empreinte écologique. Elle possède alors une « réserve écologique », condition sine qua non de la durabilité ou de sa responsabilité environnementale. Une organisation sera qualifiée de « débiteur écologique » si sa biocapacité est inférieure à son empreinte écologique. Elle ne possède alors pas de « réserve écologique ». Dans ce cas, elle n'est pas écologiquement durable. Elle manque de responsabilité environnementale. La soutenabilité du risque écologique consiste à résorber le déficit en ressources naturelles rares et à maintenir le niveau de consommation, en recourant momentanément à l'importation et à la liquidation des actifs écologiques. Le système devient écologiquement risqué ou faiblement responsable, lorsque le déficit écologique s'installe de manière chronique. Une organisation est en

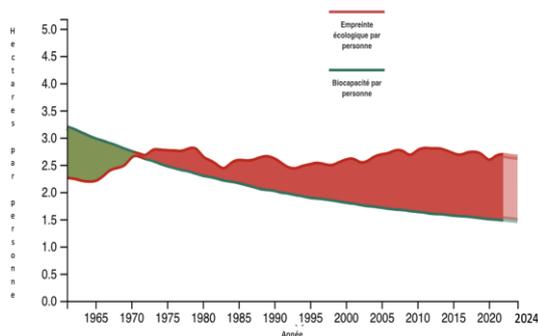
position d'équilibre écologique, lorsque sa biocapacité est égale à son empreinte écologique.

Après avoir présenté l'état de l'art de la mesure du risque écologique soutenable, nous analyserons les résultats de l'analyse en composantes principales pour démontrer la pertinence de la mesure du risque écologique soutenable, avant de conclure.

2. ÉTAT DE L'ART DE LA SOUTENABILITE DU RISQUE ECOLOGIQUE

La notion de risque écologique soutenable s'inspire de la théorie de la gestion stratégique des organisations d'après laquelle, les dirigeants peuvent accroître la valeur de leur organisation en prenant en compte les conséquences environnementales, sociales et économiques de leurs activités, lorsqu'ils prennent des décisions (Freeman, 1984). Mais les dirigeants démembrement leur responsabilité environnementale et cherchent graduellement, la couverture des risques de leurs actions pour assurer la création de la valeur. Au plan éthique, il s'agit d'appliquer le concept de développement durable aux organisations pour satisfaire les besoins des générations actuelles du marché sans compromettre ceux des générations futures.

Cette notion a été ensuite étendue à la Responsabilité Sociétale et Environnementale de l'Entreprise (RSE) pour prendre en compte la dimension citoyenne des organisations. Elle conduit à chercher la compatibilité écologique de l'activité des organisations avec l'équilibre du climat et des écosystèmes. La notion de RSE devient alors globalisante (Igalens J., 2008) en cherchant à maintenir l'équilibre entre l'empreinte écologique et l'empreinte carbone. Cet équilibre est rompu depuis 1970, année à partir de laquelle l'empreinte écologique par personne dépasse les biocapacités par personne, plongeant à jamais le monde dans un chronique déficit des ressources écologiques (Figure n°1).



Sources de données : Comptes nationaux de l'empreinte et de la biocapacité, édition 2025 (année de données 2022) ; PIB, Statistiques financières internationales (IFS) ; Population, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <https://data.footprintnetwork.org/#/>

Figure 1 : Le déficit chronique du monde en ressources écologiques

Ce déficit divise le monde en deux groupes. Les pays débiteurs en ressources écologiques qui ont épuisé leurs ressources, mais qui continuent de créer de la valeur en important des ressources des pays créditeurs en ressources écologiques et qui créent faiblement de la valeur. Créer de la valeur en ayant une position écologique déficitaire, est une stratégie de développement qui s'enracine dans les travaux de Bowen (1953) qui incitent les organisations à intégrer les préoccupations sociales, environnementales et économiques de l'État dans leurs activités et dans leurs interactions avec les parties prenantes sur une base volontariste. Mais, les pollueurs ne sont pas volontairement payeurs des dommages qu'ils causent sur l'environnement par leurs activités. Ce qui pousse l'État à intervenir par des moyens fiscaux pour réguler la RSE.

C'est pourquoi, pour résoudre la tension entre volontarisme et interventionnisme, les États ont mis en place un arsenal juridique comme en France où, des obligations légales incombent aux entreprises de 500 salariés depuis la loi portant sur l'Engagement National pour l'Environnement du 12 juillet 2010, modifiée par la Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte. Cette loi pose le principe de la généralisation des bilans d'émissions de gaz à effet

de serre (GES) tous les 4 ans pour les entreprises et tous les 3 ans pour les services de l'État, les collectivités territoriales et les autres personnes morales de droit public.

Au niveau international, les Conférences des 196 Parties (COP) signataires des Conventions-cadres des Nations Unies sur le changement climatique, la Désertification et la Biodiversité exigent la maîtrise du risque écologique soutenable, définit comme le niveau du coût environnemental qui optimise l'interaction entre la sobriété énergétique et la sobriété écologique, nécessaire pour assurer la création de la valeur dans les organisations. Dans leurs recherches visant à renforcer la résilience des organisations dans les régions où l'eau est rare, Rockstrom et al. (2009) ont déterminé les neuf limites planétaires fondamentales pour maintenir un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité ». Ce cadre est utilisé pour guider les Gouvernements, les organisations internationales, les ONG et les entreprises qui envisagent les stratégies de développement durable. Il en résulte que l'homme a déjà dépassé trois de ces neuf limites constituant les trois COP actuels (Figure 2). Le rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2022), indique que : « Les 10 % de ménages ayant les émissions par habitant les plus élevées contribuent à 34-45 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. À l'inverse, les communautés qui ont le moins contribué historiquement au réchauffement sont celles qui subissent les conséquences les plus graves. Par exemple, la mortalité due aux inondations, à la sécheresse et aux tempêtes a été jusqu'à 15 fois plus élevée dans les pays du Sud au cours de la dernière décennie ». Les politiques actuellement en œuvre nous mènent à un réchauffement de 3,2°C en 2100, un monde invivable dans de nombreuses régions et pour beaucoup d'espèces.

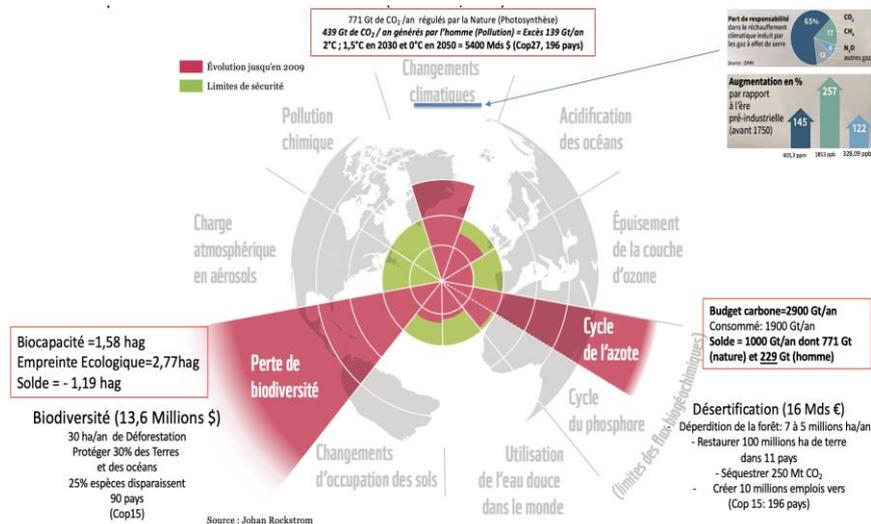


Figure 2 : Les 3 des 9 frontières de la Terre ont été atteintes depuis 2009

2.1 La sobriété énergétique : la maîtrise de l'empreinte carbone

L'empreinte carbone d'une activité humaine est une mesure des émissions des GES d'origine anthropique. Elle dépend des facteurs d'émission des intrants liés à cette activité et en particulier ceux associés aux sources d'énergie utilisées. La mesure des facteurs permet d'établir des bilans d'émissions et d'investir dans des équipements ou dans des procédés consommant moins de ressources énergétiques fossiles qu'alternatives ou renouvelables de manière à moins affecter le climat terrestre.

Le rapport du GIEC, publié le 14 mars 2023, a souligné le manque de sobriété énergétique du modèle de développement à faible résilience environnementale adopté par les pays industrialisés depuis la révolution industrielle comme l'une des principales causes du réchauffement climatique, de la Désertification et du déséquilibre des écosystèmes de la planète. La sobriété énergétique qui a été élevée au rang de levier principal d'accélération de la lutte contre le dérèglement climatique, consiste à produire et à consommer davantage des énergies renouvelables que des énergies fossiles pour éviter que ces dernières n'augmentent de 1,5°C, la température de la terre d'ici 2030, intensifiant les phénomènes météorologiques extrêmes, accentuant la pauvreté, les inégalités et engendrant des maladies émergentes.

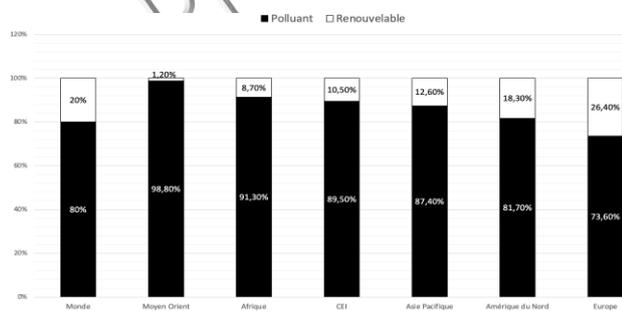
Par conséquent, pour l'humanité, « il n'y a plus de place pour de nouveaux investissements dans les énergies polluantes comme le charbon, le pétrole et le gaz, et les émissions doivent être taxées et réduites de moitié au cours de la prochaine décennie. Il est temps que les nations industrialisées assument leur responsabilité face à l'état critique de la planète pour agir sur la demande en énergie et la consommation de biens et services, afin de réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) de 40 à 70 % d'ici à 2050 ». L'Europe, pour sa part, s'engage à réduire ses émissions de 55% à cette échéance. Mais, les émissions continuent d'augmenter et les politiques actuelles entraîneront un réchauffement de 2,7°C ou plus d'ici la fin du siècle.

Or, depuis la première Cop de Berlin 1995, les 197 pays membres cherchent à atteindre la neutralité carbone, définie comme l'émission de la même quantité de carbone dans l'atmosphère que celle que la nature peut absorber. Le carbone, le plus important des GES, dont l'excès dans l'atmosphère, détruit la couche d'ozone, augmente la température de la terre et menace la survie de l'humanité. En cause, les modes de vie et les habitudes de production et de consommation des énergies et des matières premières des pays industrialisés qui ne sont pas compatibles avec la neutralité carbone.

Stables jusqu'à la Révolution Industrielle du 19^e siècle, les concentrations d'émissions des GES ont augmenté de 400 Parts Par Million (PPM), après avoir été sous la barre des 300 PPM depuis plus de

800 000 ans (GIEC, 2013). Cette évolution s'est traduite par l'augmentation de la température terrestre de 1°C. Durant cette dernière décennie, cette température a atteint 1,1°C et le seuil fatidique de 1,5 °C est prévu pour 2100, si l'humanité n'émettait pas 300 Gt de dioxyde de carbone (CO₂) par an contre les 439 Gt de CO₂ actuels par an. L'excédent de 129 Gt de CO₂ par an représente le risque climatique. Depuis 1900, le niveau de la mer a augmenté de 20 cm et risque d'augmenter encore de 20 cm d'ici 2050. Entre 3,3 et 3,6 Mds de personnes sont exposées à des vulnérabilités liées aux changements climatiques.

Cependant, le bilan énergétique des activités humaines, en 2019, montre que l'homme consomme moins de 20% des énergies renouvelables ou non polluantes dans le total du mix énergétique mondial contre 80% des énergies fossiles ou carbonées (polluantes). Ces proportions sont respectivement de 17,9% et 82,1% en 2021. Dans ce mix énergétique, les régions fortement industrialisées ont une part des énergies renouvelables supérieure à 10%, alors que les régions sous industrialisées sont en dessous de ce seuil. La consommation des énergies carbonées au Moyen Orient était de 98,8% du total du mix énergétique contre 1,2% d'énergie renouvelable, 91,3% contre 8,7% en Afrique, 89,5% contre 10,5% dans la CEI, 87,4% et 12,6% en Asie pacifique, 81,7% et 18,3% en Amérique du Nord, et 73,6% contre 26,4% en Europe (Figure 3)



Source : d'après <https://fr.statista.com/infographie/26414/empreinte-ecologique-carbone-emissions-par-habitant-selon-region-du-monde/>

Figure 3 : Empreinte carbone mondiale en 2019 (%)

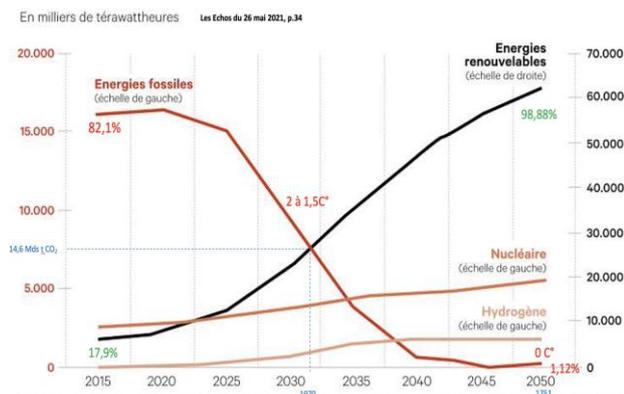
La neutralité carbone nécessite l'inversion des proportions des énergies carbonées par rapport aux

énergies renouvelables, pour atteindre un bilan énergétique responsable au moyen de l'équation énergétique de type : 1/3 d'énergies carbonées et 2/3 d'énergies renouvelables.

Le développement à faible sobriété énergétique comme responsable du réchauffement climatique :

Les GES produits par l'homme captent, retiennent l'énergie solaire et limitent les mécanismes de la photosynthèse naturelle sur terre. Ils sont composés du CO₂ (52%), du méthane (42%), du protoxyde d'azote (4%) et d'autres gaz (2%). Leur contribution au réchauffement climatique est respectivement de: 65%, 17%, 6% et 12%. Selon l'AFP (2019), depuis 1790, ils ont augmenté respectivement de 147%, 259% et 123%. Le GIEC (2022) a estimé le budget carbone de l'humanité de 2900 Gt équivalent CO₂ dont 1900 ont déjà été consommés, et il ne reste plus que 1000 Gt équivalent CO₂ disponibles pour l'humanité. En 2015, l'empreinte carbone était de 4,372 t de CO₂ contre 6,6 t par habitant en 2019. En Afrique subsaharienne, cette moyenne est de 1,6 tonne, contre 9,7 t en Europe et 20,8 tonnes en Amérique du Nord.

Le volume du carbone généré et régulé par la nature est de 771 Gt de CO₂ par an. Il provient à 55% des vapeurs d'eau, 28% du CO₂ et 17% des nuages. Le mix énergétique de l'homme y ajoute 439 Gt équivalent CO₂ par an dont 29% provenant de ses procédés industriels, 23% résidentiel et tertiaire, 17% déforestation, 15% transports, 13% agriculture et 3% déchets et égouts. Le volume total du carbone généré par la nature et par l'homme est donc de 1210 Gt de CO₂ par an ; alors qu'il devrait être de l'ordre de 771 plus 300 Gt de CO₂. La différence entre ces deux volumes donne un excédent de 149 Gt de CO₂ que l'homme est invité à neutraliser en la détruisant lui-même pour ramener la température de la terre de 2 à 1,5°C d'ici 2030. A cette date, ce volume correspondrait à celui de 1970 ; alors que la température de 0°C en 2050 correspondrait à un niveau du CO₂ de 1751 (Figure 4).



Source : D'après les Échos du 26 mai 2021 p.34

Figure 4 : Évolution du mix énergétique du monde de 2015 à 2050

La notation de (CDP, 2021) montre qu'au niveau de l'échantillon de 13 189 entreprises du monde, seulement 14 ont la note A et sont éco-responsables sur les dimensions climat, forêt et hydrique (Figure 5).

Company	Climate Change	Forests	Water Security
Danone	A	A	A
FIRMENICH SA	A	A	A
FLUJI OIL HOLDINGS INC.	A	A	A
HP Inc.	A	A	A
International Flavors & Fragrances Inc.	A	A	A
KAO Corporation	A	A	A
Klabin S/A	A	A	A
Lenzing AG	A	A	A
L'Oréal	A	A	A
Metaâ Board Corporation	A	A	A
Mondi PLC	A	A	A
Philip Morris International	A	A	A
Symrise AG	A	A	A
Unilever plc	A	A	A

Source : D'après <https://www.cdp.net/en/companies/companies-scores>

Figure 5 : Le top 14 entreprises les plus éco-responsables du monde en 2021

2.2 Les potentialités du modèle à forte sobriété énergétique de l'Afrique :

Entre 1890 et 2018, l'Afrique n'a émis que 36 Gt équivalent CO₂, soit environ 4% des GES du monde qui sont absorbés par la photosynthèse naturelle. Un consortium international de chercheurs a montré que les forêts tropicales humides d'Afrique absorbent chaque année, la même quantité de carbone que celle émise par l'utilisation de combustibles fossiles sur l'ensemble du continent dans les années 2010 (Brandt, 2018). Mais, la capacité de la forêt tropicale à absorber du dioxyde de carbone diminue à mesure que les températures

augmentent avec la déforestation. Cette dernière est de l'ordre de 5% l'an et représente 8% des émissions mondiales de CO₂.

Or, l'Afrique n'est pas à l'abri des conséquences du dérèglement climatique comme l'indiquent (Brandt, 2018) pour qui, le continent africain a enregistré sur la période 2010-2016, un bilan net de carbone négatif (-0.10 PgC yr-1). La majorité des pertes de carbone s'est produite dans les savanes arborées des régions semi-arides où, les pertes brutes annuelles représentent 5% du total des stocks de carbone disponible. Ces déficits qui restent faibles, montrent que l'Afrique n'est pas à l'abri du dérèglement climatique.

En effet, l'Afrique dispose d'un potentiel d'énergies renouvelables estimé à 1475 GW, soit près de dix fois la production totale d'électricité carbonée actuelle. Pour atteindre les Objectifs du Développement Durable en matière d'énergie, l'Afrique devra doubler sa capacité de production d'ici à 2030 et la multiplier par cinq d'ici à 2050. Mais, à peine 5 gigawatts (GW) d'énergie solaire photovoltaïque sont installés en Afrique, soit moins de 1 % du total mondial, alors que ce continent est doté de 40 % des ressources solaires globales.

Avec un déficit de financement des infrastructures électriques estimé entre 40 et 45 Mds \$ par an, l'Afrique est sous la pression d'une urbanisation rapide qu'accroît les 2 Mds d'habitants d'ici 2040, dont un demi-milliard de nouveaux urbains, avec une industrie en fort développement. Plus de la moitié de la population africaine, soient 600 millions d'habitants, n'ont pas accès à l'électricité en 2018 et environ 80 % des entreprises d'Afrique subsaharienne subissent des coupures fréquentes, entraînant des pertes économiques substantielles.

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2019) propose un scénario à long terme intitulé « Africa Case » qui vise un développement inclusif et durable, la réduction significative des décès prématurés liés à la pollution ainsi que l'atteinte des objectifs d'accès universel à l'électricité et aux solutions de cuisson propre, en cohérence avec l'Agenda 2063 de l'Union Africaine, repose essentiellement sur l'énergie solaire. Le déploiement du photovoltaïque pour atteindre en

moyenne 15 GW par an et 320 GW d'ici 2040, moyennant 120 Mds \$ d'investissement par an, dotera le continent de plus de 70% d'énergie propre, avec moins de 3% d'émission de GES.

2.3 Les conditions de la généralisation du modèle résilient :

La reproduction de ce modèle de neutralité carbone à l'échelle mondiale, nécessite la rupture du cycle infernal des GES, la maîtrise de la transition énergétique et l'investissement dans les économies renouvelables.

La rupture du cycle infernal des GES : En 1973, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était de 13,3 % contre 11,3% en 2019, après avoir franchi les 17,9 %, en 2018 dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, ...) et de 11 % d'énergies renouvelables « modernes ». Dans cette dernière catégorie, les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire) représentent 4,2 %, l'hydroélectricité (3,6 %), les autres renouvelables électriques (éolien, biogaz) 2% et 1 % de biocarburants. Les travaux du GIEC (2015) indiquent qu'il faudrait réduire les émissions mondiales de l'ensemble des GES de 40% à 70% d'ici à 2050 par rapport au niveau de 2010 (49 Gt équivalent CO₂ contre 55,3 Gt équivalent CO₂ en 2018) pour limiter le réchauffement climatique en dessous de 2°C d'ici à 2100. Les projections de l'AIE (2015) sur l'évolution de la consommation mondiale d'énergie finale, montrent que le volume passera de 9 384 Mtep en 2015 à 12 538 Mtep en 2040. Pour respecter la trajectoire des « 2°C », la consommation mondiale d'énergie finale devrait se limiter à 10 706 Mtep en 2040. Soit un solde excédentaire de 1 832 Mtep en 2040 qu'il faudra éliminer y compris les GES qu'il génère.

Or, les Cop 3 (Tokyo, 1997) et Cop 21 (Paris, 2015), avaient valorisé deux modèles d'absorption des GES par photosynthèse naturelle : le puits d'oxygène forestier et le puits marin. Le premier extrait les GES en les détruisant par la photosynthèse oxygénique des plantes au moyen des rayons solaires ultraviolets (45%). Le processus se produit dans les feuilles des arbres en deux phases distinctes : la phase claire et la phase sombre, appelées ainsi car seule la première nécessite l'apport d'énergie lumineuse. Pendant la

première phase, la feuille capte la lumière solaire, du CO₂ dans l'air et de l'eau dans la terre par ses racines. Dans la deuxième phase, produit la réaction chimique sous l'effet de l'énergie solaire. Les thylakoïdes, petits compartiments très plats situés à l'intérieur du chloroplaste et constitués en majorité de leur membrane où, sont encastrés des ouvriers cruciaux de la photosynthèse : des protéines nommées photosystèmes I et II, et deux enzymes, le cytochrome b6f qui se trouve entre les deux photosystèmes et l'ATP synthase et produisent l'énergie sous forme de sucre qui alimente la plante.

Le second, les stocke dans les océans (25%) et le sous-sol (30%) où, la photosynthèse anoxygénique produit, sous l'effet de l'infrarouge, le CO₂ organique non polluant (énergie magnétique) qui alimente le vivant et contribue à la formation des combustibles fossiles et des minerais durant plusieurs années. Mais, ces puits naturels n'éliminent qu'entre 9,5 et 11 gigatonnes (Gt) de CO₂ par an, alors qu'en 2019, l'activité humaine a émis 38 Gt de CO₂ dont 50% en Asie, 18% en Amérique du Nord, 15% en Europe, 8% en Moyen Orient, 4% en Afrique, 3% en Amérique du Sud, 1% en Océanie et 1% en Amérique Centrale. Soit un solde excédentaire de 28 Gt de CO₂ non absorbés qui contribuent à polluer l'atmosphère.

Le monde a une couverture forestière totale de 4,06 milliards d'hectares, dont 1,8 milliard d'hectares de forêts tropicales. L'Amazonie qui abrite la moitié des forêts tropicales particulièrement efficaces pour absorber le carbone, stocke 450 milliards de tonnes de CO₂ dans ses arbres et ses sols, devient une source constante de CO₂ à cause de la déforestation. Cette dernière est passée de 15% en 2015 contre 6% en 1985 dont 80 à 90% sont des pâturages. Elle relâche 123 milliards de tonnes de carbone dans l'atmosphère et, entre 2010 et 2019 près de 20 % de CO₂ de plus qu'elle n'en avait émis (*Les Échos* du 15 juillet 2021).

Il reste le deuxième poumon mondial d'oxygène, le Bassin du Congo, avec ses 268 millions d'hectares de forêt en Afrique centrale qui séquestrent 140 millions de tonnes de carbone par an. Il comprend le plus grand complexe de tourbières tropicales au monde, d'une superficie de 14,6 millions d'hectares qui absorbent 30 milliards de tonnes de carbone supplémentaires. Les tourbières de la Cuvette centrale, couvrant 145 500 km², renferment un peu

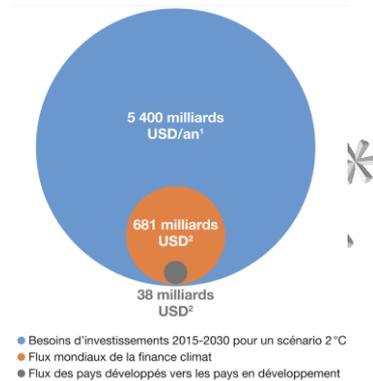
plus de 90 milliards de tonnes de carbone, soit l'équivalent de trois ans d'émissions, faisant de la région, l'un des écosystèmes les plus riches en carbone sur Terre.

En effet, la photosynthèse naturelle est un processus bioénergétique permettant aux organismes vivants de synthétiser de la matière organique en utilisant l'énergie solaire, l'eau (H₂O), le gaz carbonique (CO₂) et le phosphate (H₃PO₄). Le rayonnement solaire sur la terre est une constante ou quantum solaire de 1350 w/m², qui forme le spectre lumineux électromagnétique visible par l'œil humain, allant de l'infrarouge (760 nm) à l'ultraviolet (360nm). Il se compose à 55% de l'infrarouge, 40% d'énergie visible et à 5% d'ultraviolet. L'énergie solaire et ses dérivés (vent, chute d'eau, marémotrices, hydroliennes liées aux courants, etc.) sont des sources énergétiques intermittentes. Leurs flux naturels varient fortement sans possibilité de contrôle, leur efficacité énergétique, est comprise entre 3 et 6 % contre 14 à 16 % pour une cellule photovoltaïque en silicium monocristallin. La difficulté de produire artificiellement l'énergie solaire, conduit le génie génétique vers les cyanobactéries modifiées, organismes, procaryotes mixotrophes, ne présentant ni noyau véritable, ni plaste, ni reproduction sexuée qui peuvent convertir de l'énergie solaire en carburant, en fixant par photosynthèse, le carbone du dioxyde de carbone et en libérant du dioxygène. Mais la production de ces bactéries à l'échelle industrielle est encore problématique.

Le même problème se pose dans l'approche connue sous le nom de cycle de Calvin qui utilise la photosynthèse anoxygénique, en faisant intervenir l'enzyme Rubisco¹, et qui conserve l'oxygène (O₂) par réduction du Carbone (Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate (NADPH)), transformation de l'Adénosine Triphosphate (ATP) et stockage du CO₂. Quant au cycle de Krebs inverse, les bactéries fixent le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau (H₂O) sous forme d'acétyl-CoA en utilisant l'hydrogène (H₂), l'ion sulfure (S₂⁻) ou encore l'ion thiosulfate (S₂O₃²⁻) comme donneurs d'électrons.

¹ Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase /oxygénase

La maîtrise de la transition énergétique : Le GIEC (2022) estime le coût de la transition énergétique à 2300 Mds \$ par an. Le doublement du financement souhaité par la Cop26 (Glasgow, 2021), souffre d'un manque d'engagement politique réel de la communauté internationale. Les besoins d'investissements entre 2015 et 2030 pour atteindre le scénario de 2°C s'élèvent à 5 400 Mds \$ par an, alors que les flux mondiaux de la finance climat ne s'élèvent qu'à 681 Mds \$ et que les flux des pays développés vers les pays en développement ne sont que de 38 Mds \$ par an (Figure 6).



Sources : D'après : Better Growth, Better Climate, The New Climate Economy, 2014 (1); Rapport biennal d'évaluation des flux de la finance climat, CCNUCC, 2018 (2)

Figure 6 : L'écart entre les besoins d'investissements et les flux mondiaux de la finance climat de 2015-2030

La structure du financement montre que 62,85% sont des fonds bilatéraux contre 37,15% de dons. Les fonds bilatéraux comprennent 32,9% de subventions, 45,4% de prêts et autres instruments concessionnels, 16,4% de prêts et autres instruments non concessionnels, 0,4% de prises de participations et 4,9% autres (Figure 7).

Bailleur de fonds	Total bilatéral déclaré (en millions de dollars)	Subventions	Prêts et autres instruments concessionnels	Prêts et autres instruments non concessionnels	Prises de participation	Autre	Estimation de la part des dons (en millions de dollars)
Australie	119	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	119
Canada	307	33,4 %	61,8 %	0 %	4,9 %	0 %	212
Danemark	159	98,8 %	0 %	0 %	1,2 %	0 %	159
Institutions de l'UE (hors BEI)	3 157	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	3 157
France	4 778	3,3 %	74,2 %	16,1 %	0 %	6,3 %	1 309
Allemagne	7 026	36,4 %	41,1 %	22,5 %	0 %	0 %	3 461
Japon*	9 688	2 %	74 %	24 %	0 %	1 %	5 025
Pays-Bas**	364	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	364
Norvège	651	71,7 %	0 %	0 %	0 %	28,3 %	513
Espagne**	263	37 %	8 %	55 %	0 %	1 %	108
Suède	438	99,7 %	0 %	0 %	0 %	0,3 %	437
Suisse	221	99 %	0 %	0 %	1 %	0 %	221
États-Unis	1 898	67 %	0 %	9 %	0 %	24 %	1 382
Royaume-Uni	1 116	91,1 %	0,7 %	0 %	8,2 %	0 %	1 110
Total****	31 005	32,9 %	45,4 %	16,4 %	0,4 %	4,9 %	18 299

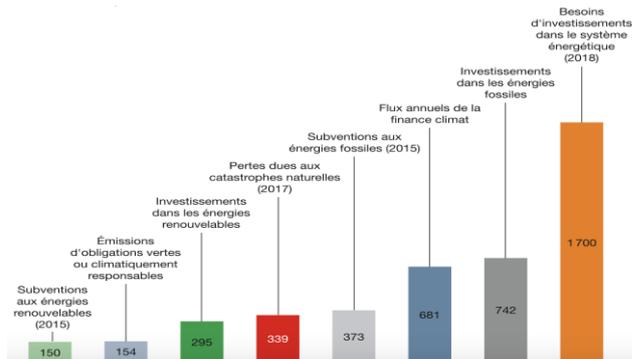
Source : d'après : <https://www.oxfamfrance.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-Les-vrais-chiffres-des-financements-climat.pdf>

Figure 7 : La structure du financement du climat en 2018

Les pays pourvoyeurs de fonds sont essentiellement les pays de l'OCDE (2021) qui ont mobilisé entre 2016 et 2019 : 49 304 millions \$ dont 29,84% par le Japon, 21,27% par l'Allemagne, 12,35% par la France, et 4,51% par les USA. Parmi ces fonds, 43% ont été octroyés à l'Asie, 26% à l'Afrique, 17% aux Amériques, 3,2 % à l'Europe, 0,5% en Océanie et 9% autres (OCDE, 2019). Les financements actuels concernent:

- **les économies rouges ou polluantes** à 28,5 Mds \$ pour inciter les 23 pays les plus polluants du monde à produire et à consommer davantage des énergies renouvelables (COP21). Mais, les grands pollueurs augmentent leur pollution comme la Chine qui émet 26% du CO₂ mondial en 2015 contre 30,7% en 2020 et l'Inde (6,2% contre 7,1%). D'autres grands pollueurs ne réduisent pas assez leurs émissions de CO₂ comme les USA (16% à 13,8%), l'Union Européenne (11% à 7,9%), la Russie (5,20% à 4,6%) et le Japon (5,20% contre 3,2%). Les investissements dans les énergies fossiles de 742 Mds \$ en 2016 représentent 2,8 fois les investissements dans les énergies renouvelables 295 Mds (Figure 8);

- **les économies vertes ou écologiques**, fournisseurs des crédits de carbone aux industries polluantes sur plus de 17 marchés de carbone, valant entre 1,90 et 20€/tonne (COP3). Le marché du carbone volontaire, destiné au secteur privé, voit ses volumes s'accroître de façon exponentielle. Il est passé d'environ 40 millions de tonnes de CO₂ générés et vendus en 2010 à plus de 250 millions de tonnes en 2020. En 2019 le prix moyen à la tonne de carbone était en moyenne à 3,78 \$. Le Fond vert pour le climat de 100 Mds \$ (COP16), aide les pays en développement à réduire leurs émissions de GES. Si le prix mondial du carbone était porté de 5\$ à au moins 50 \$ par tonne, cela permettrait d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris, en générant jusqu'à 30 Mds \$ par an. Alors l'augmentation de l'énergie renouvelable pourra s'approcher de 22%, et fournir à 4,5 millions de personnes supplémentaires, l'accès à une capacité de cuisson propre (CEA, 2021);



Note : les flux sont mondiaux et annuels pour l'année 2016 (sauf si indiqué autrement). Les besoins d'investissements dans le système énergétique ont été calculés pour respecter un scénario 2°C.
Source : IACE, 2018, d'après le Rapport biennal d'évaluation des flux de la finance climat, CCNUCC, 2018

Figure 8 : Le poids des énergies fossiles par rapport aux énergies renouvelables en 2016

- **les économies bleues** valorisent l'écosystème bleu par le Fonds bleu de 65 Mds € (COP22) du puits forestier du bassin du Congo et le Fonds bleu marin de l'Union Européenne de 79 Mds € du puits méditerranéen (2012). La COP26 a financé pour 150 millions \$ seulement pour le bassin du Congo sur les 19,2 Mds \$, confirmant le faible intérêt de la communauté internationale sur cette forêt tropicale. Entre 2008 et 2017, le bassin du Congo n'a reçu que 11 % des flux financiers internationaux destinés à la protection et à la gestion durable des forêts dans les zones tropicales, contre 55 % pour l'Asie du Sud-Est et 34 % pour l'Amazonie.

En Afrique, la BAD a lancé, le 14 décembre 2020, un prêt de 15 millions \$ provenant du Fonds des énergies durables pour l'Afrique (SEFA) sur 5 ans pour les PME et un autre prêt de 10 millions de dollars provenant du Fonds pour les technologies propres (CTF) pour faire progresser la réalisation des projets du Fonds africain pour les énergies renouvelables (FAER II) destinés à stimuler la production d'énergie à faibles émissions de carbone en Afrique subsaharienne de plus de 800 mégawatts d'électricité provenant de l'hydroélectricité, de l'énergie solaire et éolienne et du stockage des batteries.

2.4 L'investissement dans les économies jaunes :

La nature régule le carbone par le mécanisme de photosynthèse (Chapuis, 2019). Ce procédé peut être reproduit en laboratoire dans le cadre de l'ingénierie environnementale pour équilibrer artificiellement le carbone par rapport à l'énergie

solaire dans la composition des énergies polluantes pour obtenir des énergies, des mines et des hydrocarbures durables à forte teneur en énergie solaire (Figure 9).

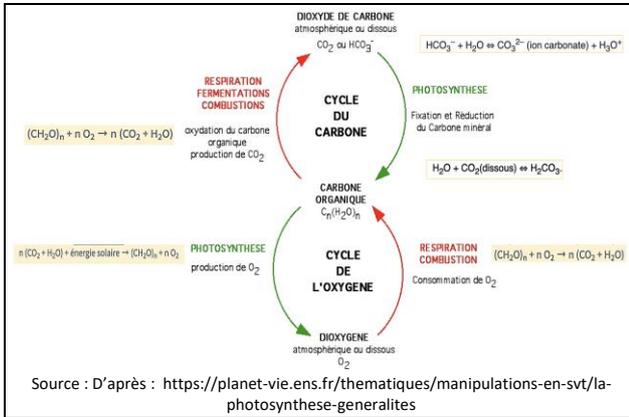


Figure 9 : Les mécanismes de la photosynthèse générale

La solution obtenue en laboratoire par ce procédé, est portée en terre où, la photosynthèse oxygénique artificielle valorise la part électrique que ces deux énergies ont en commun par l'interaction de l'ultraviolet. Elle absorbe la part magnétique qu'ils ont de différence pour générer les produits à forte teneur électrique. La photosynthèse anoxygénique artificielle valorise, quant à elle, la part magnétique que ces deux énergies ont de différence par l'interaction de l'infrarouge. Elle absorbe la part électrique qu'elles ont en commun pour générer les produits à forte teneur magnétique.

Enfin, la photosynthèse artificielle générale, cumule simultanée des synthèses additive et soustractive précédentes, stabilise la part électromagnétique que le carbone et l'énergie solaire ont en commun. Ce procédé est expérimenté par la Société Congolaise des Mines (SOCOMI) sous le concept de physique à Magnons qui lève encore difficilement les fonds sur le marché financier, alors qu'un gisement de minerais propre dure 2 500 ans pour un coût de 1 414 177 €, environ 9,3 millions FCFA. Un champ de pétrole non carboné produirait 800 000 Barils/j sur 2 500 ans contre 350 000 Barils/j sur 50 ans, pour un puit de pétrole carboné.

Cette technologie innovante suggère la fabrication et l'utilisation des nouvelles machines fonctionnant avec un moteur à énergie durable que la physique-chimie et la biologie des énergies renouvelables pourront développer dans un avenir proche.

3. LA SOBRIETE ECOLOGIQUE : LA MAITRISE DE L'EMPREINTE ECOLOGIQUE

L'empreinte écologique est un cadre comptable de la demande humaine en ressources renouvelables de la biosphère et compare cette demande à la capacité de régénération de la planète ou sa biocapacité. Il s'agit d'un indicateur et d'un mode d'évaluation environnementale qui comptabilise la pression exercée par les hommes sur les ressources naturelles rares et les écosystèmes écologiques fournis par la nature.

Cet indicateur mesure les surfaces alimentaires productives de terres et d'eau nécessaires pour produire les ressources qu'un individu, une population ou une activité consomme et pour absorber les déchets générés, compte tenu des techniques et de la gestion des ressources en vigueur. La surface productive totale ou biocapacité, est exprimée en hectares globaux (hag), c'est-à-dire en hectares ayant une productivité égale à la productivité moyenne. La biocapacité est le produit de la surface par la bioproduktivité. L'empreinte écologique s'obtient par le produit de la population par la consommation par habitant par l'intensité en ressources et en déchets.

Ce concept a été créé par (Rees, 1992) qui le définit comme : « la surface correspondante de la terre productive et des écosystèmes aquatiques nécessaires à produire les ressources utilisées et à assimiler les déchets produits par une population définie à un niveau de vie matériel spécifié, là où cette terre se trouve sur la planète ». Il tire son inspiration des approches géo biophysiques de la biosphère et de l'écologie du XXe siècle qui ont contribué à la notion unifiante soutenabilité du développement et au concept économique d'internalisation des coûts externes (environnementaux et sociaux). Mais, il est souvent confondu avec une mesure du bien-être-social d'une population (Grazi, 2007), (Newman, 2006) qui a fait valoir que le concept d'empreinte écologique pouvait avoir un parti pris anti-urbain, car il ne tient pas compte des opportunités créées par la croissance urbaine. En réalité, l'empreinte écologique est recalculée chaque année, en tenant compte de tous les changements intervenus dans l'organisation y compris technologiques (Lin, 2018).

	1961	1971	1981	1991	2001	2011	2018	2020	2021	2022
Empreinte écologique (I)	2,28	2,7	2,64	2,57	2,51	2,84	2,77	2,7	2,8	2,79
Biocapacité (II)	3,15	2,7	2,3	2,01	1,83	1,68	1,58	1,6	1,8	1,6
Solde (I-II)	0,87	0	-0,34	-0,56	-0,68	-1,16	-1,19	-1,1	-1	-1,19

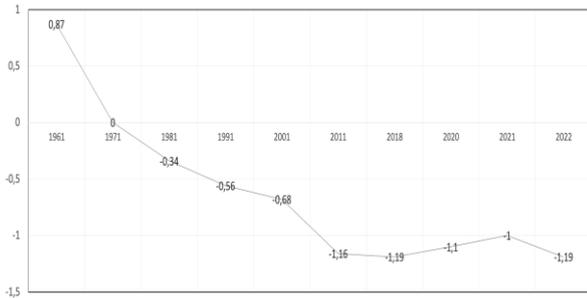


Figure 10 : Évolution du solde des ressources écologiques du monde depuis 1961

Le risque écologique est donc le solde obtenu par la différence entre la biocapacité et l’empreinte. Un déficit écologique se produit lorsque l’empreinte écologique d’une population dépasse la biocapacité de la zone disponible pour cette population (Figure 10). Cela signifie que la nation importe de la biocapacité par le biais du commerce, liquide ses actifs écologiques nationaux et émet des déchets de dioxyde de carbone dans l’atmosphère. Une réserve écologique existe lorsque la biocapacité dépasse l’empreinte écologique. Cela signifie que l’organisation optimise sa biocapacité, ne liquide pas actifs écologiques et a atteint sa neutralité carbone. Une réserve nulle est l’expression de l’égalité entre l’empreinte écologique et la biocapacité. Cela indique que pour vivre avec les limites des ressources rares disponibles, l’empreinte écologique est égale à la biocapacité disponible par personne.

L’analyse en composantes principales des données extraites de la base de données de *Global Footprint Network* (2021) sur 188 pays entre 1961 et 2018 (Figure 11), montre que l’empreinte écologique mondiale est en nette évolution en passant de 2,28 hag ou 7 Mds \$ en 1961 à 2,7 hag ou 10,3 Mds \$ en 1971 contre 2,77 hag ou 21,2 Mds \$ en 2018. Dans le même temps, la biocapacité mondiale a presque diminué de moitié, en passant respectivement de 3,15 , 2,7 à 1,58 hag (Figure 10). Il en résulte que l’humanité, après avoir été créditeur écologique de 0,87 hag en 1961 a épuisé ses ressources en 1971. Son déficit écologique est passé de 0,13 hag en 1972 à 1,19 hag en 2018. Cela indique que la dette écologique de l’humanité augmente et nécessite de

développer des mesures régulatrices écologiquement fonctionnelles et efficaces.

L’analyse factorielle des données des pays étudiés montre que sur la période de 2013 à 2021 (Figure 10): 27,87% en 2021 sont « créditeurs écologiques » ou possèdent une « réserve écologique contre 36,17% en 2013. Ce groupe des pays à forte responsabilité écologique montre que moins le PIB par habitant est fort plus le crédit écologique est élevé, est constitué essentiellement des pays en voie de développement et de quelques pays industrialisés, écologiquement responsables. Parmi ces pays, 37,25% sont créditeurs avec un pourcentage de plus de 100% que leur biocapacité dépasse leur empreinte écologique de la période. Ce sont les pays qui ont un très faible PIB par habitant compris entre 17 000 et 300 \$ comme le Gabon (869%), le Congo (754%), la RCA (524%), le Brésil (233%), RDC (176%), l’Érythrée (177%) et l’Angola (113%). 27,46% sont créditeurs avec un pourcentage compris entre 99 et 50% que leur biocapacité dépasse leur empreinte écologique. Ce sont les pays ayant un PIB par habitant moyen compris entre 55 000 et 100 000 \$ comme la Finlande (88%), le Canada (83%), la Nouvelle-Zélande (67%) et l’Australie (62%). 35,29% sont créditeurs avec un pourcentage de moins de 50% que leur biocapacité dépasse leur empreinte écologique. Ce sont les pays qui ont un PIB par habitant de plus de 100 000 \$ comme la Norvège (22%) et la Suède (43%).

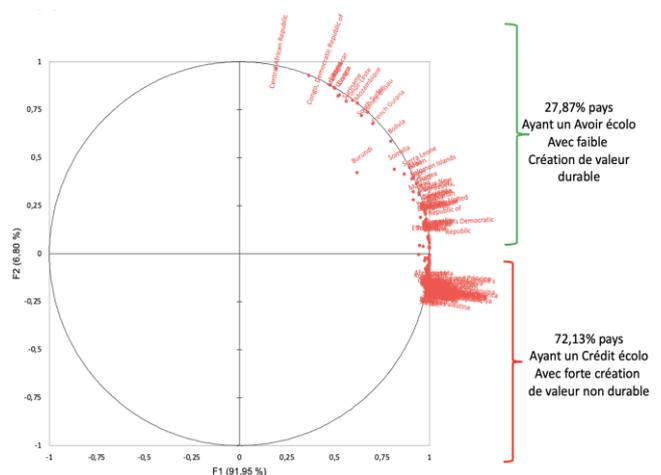


Figure 11 : Position écologique des 198 pays de 2013 à 2021

Les pays débiteurs écologiques ou en déficit de réserve écologique, représentent 72,13% du total des pays étudiés en 2021 contre 63,83% en 2013. Ils

montrent que plus le PIB par habitant du pays est élevé plus le déficit écologique est fort. Dans ce groupe des pays à faible responsabilité écologique, 5,84% de débiteurs ont un pourcentage de plus 1000% que leur empreinte écologique dépasse leur biocapacité de la période. Il s'agit essentiellement des nouveaux pays avancés ayant un PIB par habitant compris entre 48 000 et 70 000 \$ comme Singapour (10400%), Israël (2440%) les Émirats-Arabs Unis (1470%) et le Qatar (1450%). Ils sont suivis par les 16,78% des pays débiteurs ayant leur empreinte écologique qui dépasse entre 999 et 300% leur Biocapacité. Ce groupe comprend les anciens pays industrialisés ayant un PIB par habitant compris entre 70 000 et plus de 150 000 \$ comme le Luxembourg (972%), le Japon (678%), la Belgique (801%) et autres. 54,74% des pays débiteurs ont leur empreinte écologique qui dépasse entre 299 et 50% leur biocapacité. Ce sont les pays qui ont un PIB par habitant compris entre 10 000 et 2 500 \$ comme l'Allemagne (213%), le Portugal (252%), la Pologne (152%), la Tunisie (195%) et le Ghana (54%). 22,64% des pays débiteurs ont leur empreinte écologique qui dépasse de moins 50% leur biocapacité. Ce groupe est constitué des pays ayant un PIB par habitant inférieur à 2 500 \$ comme l'Indonésie (38%), le Burkina Faso (26%) et le Sénégal (27%).

En divisant la biocapacité par l'empreinte écologique et en multipliant le tout par 365 jours, on obtient la Date d'épuisement du budget des ressources naturelles (DE). Soit:

$$DE = \left(\frac{\text{Biocapacité}}{\text{Empreinte écologique}} \right) * 365 \text{ j.}$$

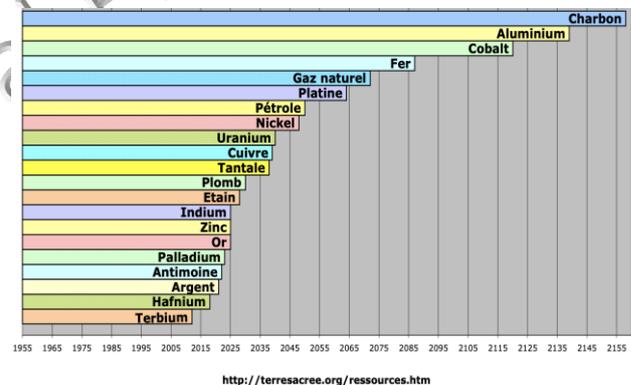
Cette date indique le degré de pression qu'exerce l'homme sur la planète par an pour subvenir à ses besoins. Elle est évaluée en surface terrestre bioproductive. Depuis 1972, la DE du monde est passée de 1 planète, le 29 décembre 1970 à 1,7 planète le 22 août 2020 contre 1,6 planète, le 29 juillet 2021 et le 28 juillet en 2022. Le recul de trois 3,29 semaines en 2021 par rapport à 2020, s'explique essentiellement par la pandémie de la Covid-19 et par les mesures prises en conséquence (Figure 12).



<https://overshoot.footprintnetwork.org/newsroom/dates-jour-depassement-terre/>

Figure 12 : Le jour de dépassement des ressources de la planète depuis 1971

L'empreinte écologique mondiale a dépassé les capacités de la planète depuis la fin des années 70, pour atteindre aujourd'hui 1,5 planète: l'humanité vit donc à crédit. Elle ponctionne davantage de ressources que ce que la nature peut régénérer. Au rythme actuel, le cap de 2 planètes sera atteint en 2030 et celui des 2,5 en 2050. Dans le même temps, les ressources carbonées s'épuisent progressivement sans que l'homme ne propose d'alternative crédible (Figure 13).



<http://terresacree.org/ressources.htm>

Figure 13 : Année d'épuisement des ressources rares au rythme de la consommation actuelle.

Exprimée en jours, la DE permet de déduire le nombre de jours d'épuisement du budget des ressources naturelles correspondant à soit à une surconsommation ou une sous consommation des ressources (JE), par la différence entre les 365 jours d'une année civile et le nombre de jours correspondant à la DE. Soit :

$$JE = 365 \text{ j} - DE$$

Au niveau mondial, le JE qui exprime le nombre de jours dans l'année où le monde vit à crédit, est passé

de 2 jours en 1971 à 100 jours en 2000 pour atteindre 154 jours en 2020 et 131 jours en 2021.

Le risque écologique soutenable (RES) est le rapport entre le nombre de jours d'épuisement ou de crédit de ressources (JE) sur le Budget Consommé en jours (DE). Soit :

$$RES = JE/DE.$$

Le RES est bon lorsqu'il est inférieur ou égal à 0,30, car à ce niveau, cela signifie que le dépassement du budget des ressources naturelles renouvelables est inférieur au tiers du budget des ressources naturelles consommées. L'organisation exerce une pression supportable sur l'environnement. Au-delà de ce seuil, le risque n'est pas soutenable, car il devient structurel. Un RES négatif indique un crédit des ressources naturelles renouvelables non utilisé durant l'année.

Pour l'humanité, le RES a été atteint en 1994 avec un déficit de 84 jours, inférieur au tiers du budget des ressources naturelles consommé (281 jours), et égal à 0,298, soit environ 0,30. Les mesures de confinement liées à la pandémie de la Covid-19 n'ont pas ralenti le risque écologique soutenable qui accroit inversement proportionnel au solde des ressources écologiques.

Toutes les régions du monde sont en situation déficitaire, sauf le Nord Amérique et les Autres pays européens qui sont en situation créditrice (Figure 14). L'Afrique est la seule région qui a atteint un RES de 0,27 en 2021 contre -0,22 en 2007. Les Autres pays européens et ceux de l'Amérique Sud ont d'importantes réserves écologiques.

	1971	1981	1991	2001	2011	2018	2020	2021	2022
Budget de consommation en jours(I)	308	318	285	266	215	208	234	210	208
Déficit en jours(II)	57	47	80	99	150	157	131	155	157
RES (II/I)	0,19	0,15	0,28	0,37	0,70	0,75	0,56	0,74	0,75
Solde des ressources écologiques	0	-0,34	-0,56	-0,68	-1,16	-1,19	-1,1	-1	-1,19



Figure 14 : Évolution du risque écologique soutenable et du solde des ressources écologiques mondial depuis 1971

Sur l'ensemble des pays vivants à crédit des ressources écologiques, ceux ayant un RES inférieur ou égal à 0,30, est passé de 22% en 2013 à 14,29% en 2021, indiquant que la surexploitation des ressources n'est que momentanée. Parmi eux, 4,27% ont basculé en 2021 dans le groupe des pays dont la surexploitation des ressources naturelles renouvelables est devenue irréversible (Bangladesh, Gambie, Kenya, Népal, Bénin et Burundi), alors qu'ils n'étaient que 2,99% en 2013. Les pays qui ont résorbé leur déficit écologique (Botswana, Éthiopie, Géorgie, Pakistan, Ukraine, Danemark, Chili et Venezuela) représentent 10,02% en 2021 contre 11,94% en 2013.

Par contre, la proportion des pays déficitaires qui n'arrivent plus à réguler leur déficit en ressources naturelles renouvelables est quasiment stable, en passant de 85% en 2013 à 85,71% en 2021 (Figure 15).

Ainsi, l'Agence Internationale de l'Energie (IAE, 2019) anticipe une baisse de 14,5 % de l'empreinte carbone sur l'année, soit 60% de l'empreinte écologique. Pour atteindre ce résultat, elle estime que la consommation d'énergie diminuera de 9,5 % sur la période allant du 1er janvier jusqu'au jour du dépassement, comparé à 2019. Ce qui n'entraînera une baisse des émissions mondiales de CO₂ que de 12,5 % sur la même période.

	2007					
	Empte Ecolo (1)	Biocapacité(2)	Solde(2-1)	DE=(21)*365	JE=(365-DE)	RES=JE/DE
Union Européenne	4,70	2,30	-2,40	178,62	186,38	1,04
Asie/Pacifique	1,60	0,80	-0,80	182,50	182,50	1,00
Asie-Est-Central	2,30	1,30	-1,00	206,30	158,70	0,77
Nord Amérique	9,20	6,50	-2,70	257,88	107,12	0,42
Monde	2,70	2,10	-0,60	283,89	81,11	0,29
Afrique	1,40	1,80	0,40	469,29	-104,29	-0,22
Autres pays Européens	3,50	5,80	2,30	604,86	-239,86	-0,40
Amérique Centrale/Carabe	2,40	4,80	2,40	730,00	-365,00	-0,50

	2021					
	Empte Ecolo (1)	Biocapacité(2)	Solde(2-1)	DE=(21)*365	JE=(365-DE)	RES=JE/DE
Nord Amérique	6,60	1,70	-4,90	94,02	270,98	2,88
Asie-Est-Central	2,90	0,80	-2,10	100,69	264,31	2,63
Asie/Pacifique	2,40	0,80	-1,60	121,67	243,33	2,00
Union Européenne	4,70	2,00	-2,70	155,32	209,68	1,35
Monde	2,80	1,60	-1,20	208,57	156,43	0,75
Amérique Centrale/Carabe	1,90	1,10	-0,80	211,32	153,68	0,73
Afrique	1,40	1,10	-0,30	286,79	78,21	0,27
Autres pays Européens	4,50	5,10	0,60	413,67	-48,67	-0,12
Sud Amérique	2,60	6,90	4,30	968,65	-603,65	-0,62

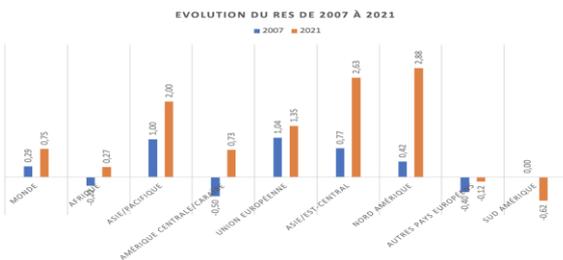


Figure 15 : Le Risque écologique soutenable (RES) au niveau régional en 2021

La surexploitation des ressources renouvelables est structurellement irréversible. Pour résorber ce risque structurel, et retrouver l'équilibre écologique, ces pays n'ont d'autre solution que de recourir à la photosynthèse artificielle. Ce groupe est composé essentiellement des anciens pays industrialisés d'Europe, d'Amérique et d'Asie qui exportent des produits manufacturés polluants vers les pays débiteurs contre l'importation des ressources écologiques durables (Figure 16).

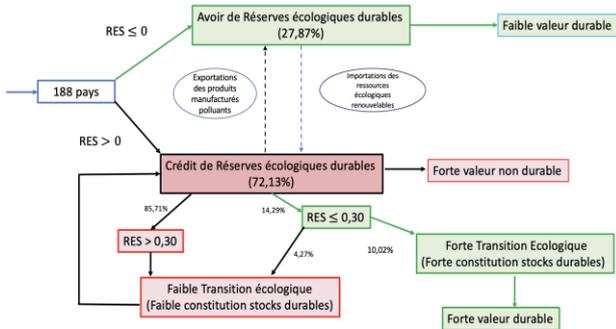


Figure 16 : Profils du risque écologique soutenable (RES) de 188 pays en 2021

La France, par exemple dont l'empreinte carbone est passée de 803 Mt équivalent CO₂ en 2010 contre 761 Mt équivalent CO₂ en 2015, la structure de cette empreinte est composée de 45,33% d'émission intérieure et 54,67% d'émission associée aux importations en 2010 contre respectivement 40,21% et 59,79% en 2015. Dans le même temps, la Désertification et la destruction des écosystèmes n'ont pas trouvé de solutions satisfaisantes à l'échelle planétaire.

3.1 La désertification :

Elle se définit comme « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, par suite de divers facteurs parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ». Elle provoque chaque année, la dégradation de 12 millions d'hectares de terres et affecte 40% de la population mondiale. Ce phénomène représente un réel danger pour la santé humaine, la biodiversité, le climat, la sécurité alimentaire, la stabilité et la sécurité. Trois actions essentielles que la Cop 15 tenue à Abidjan du 9 au 2 mai 2022 développe :

La Grande Muraille Verte (GMV), vise à : restaurer, d'ici 2030, 100 millions d'hectares de terres dégradées dans les 11 pays de la bande soudano-sahélienne sur 8000 km, séquestrer 250 millions de

tonnes de carbone, créer 10 millions d'emplois verts. L'accélérateur de l'initiative de la Grande muraille verte pour le Sahara et le Sahel a été lancé lors de la quatrième édition du « One Planet Summit » à Paris en janvier 2021, avec l'engagement de plusieurs bailleurs internationaux à mobiliser 16 Mds € sur ans, alors que les Chefs d'État et de Gouvernement de Burkina Faso, Djibouti, Érythrée, Éthiopie, Mali, Mauritanie, Niger, Nigeria, Sénégal, Soudan et Tchad, se référant à la décision du 7ème Sommet de la CEN-SAD du 1er au 2 juin 2005 à Ouagadougou (Burkina Faso), avaient mis en place l'Initiative de la Grande Muraille Verte (IGMV), endossée en 2007 par l'Union Africaine en Initiative Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel. Pour doter cette Initiative de mécanismes de coordination, d'harmonisation des actions et d'appui à la mobilisation des ressources, l'Agence Panafricaine de la Grande Muraille Verte (APGMV) a été créée, le 17 juin 2010, sous l'égide de l'Union Africaine et de la CEN-SAD. L'APGMV est une organisation interétatique disposant de la capacité juridique internationale.

Finalement, l'initiative GMV est l'expression d'une coopération des États impactés par la Désertification pour intégrer les trois Conventions de Rio et développer les logiques des politiques nationales et sous régionales de Restauration-Conservation-Protection du Capital Naturel (RCPCN), et de Développement Économique Local des terroirs. Elle cible globalement la zone saharo-sahélienne du Circum-Sahara, entre les isohyètes 100 et 400 mm;

l'initiative protéines végétales a été annoncée à l'occasion du sommet entre l'Union Européenne et l'Union Africaine en février 2022, dans le cadre de la Présidence française du Conseil de l'Union Européenne, afin de développer des cultures durables de protéines végétales en Afrique;

l'initiative 4 pour 1000 a pour but d'augmenter, par le développement de pratiques agricoles et forestières, la capacité des sols à stocker le carbone afin de lutter contre le changement climatique et améliorer la fertilité des sols pour une meilleure sécurité alimentaire.

L'ensemble de ces initiatives est financé dans un Plan Quinquennal d'Activités (PAQ) 2016-2020 estimé à environ 3 Mds \$. Il a fait l'objet d'un plan

d'intervention financière spéciale GMV, assorti d'une stratégie de mobilisation par des mécanismes et instruments innovants axés sur la Finance-Climat. Il s'agit d'une Banque GMV carbone, d'un Fonds GMV d'Adaptation et de Résilience au Climat et de Développement local, d'une accréditation aux Fonds climat et d'une admission en Agence d'Exécution des Activités de mise en œuvre de la GMV. Cette approche multisectorielle, holistique et écosystémique associant activités de Gestion Durable des Terres, de restauration des bases de production et activités de Développement économique local dans la vision de transformation des zones sahélo-sahariennes en Pôles économiques viables souffre de financements crédibles.

3.2 Biodiversité:

Ce concept a été forgé en 1985 et recouvre la diversité génétique des espèces et la diversité des écosystèmes. La biodiversité est le tissu vivant dont nous sommes à la fois acteurs et tributaires. Elle regroupe l'ensemble des milieux naturels et des organismes vivants ainsi que toutes les relations et interactions entre les organismes vivants, et entre ces organismes et leurs milieux de vie. Cette notion est essentielle au fonctionnement des écosystèmes pour l'agriculture et la régénération des sols, la régulation climatique et la protection du littoral, la qualité de l'air et de l'eau, la pollinisation, les médicaments que nous tirons de la nature, les aliments, médicaments et vêtements pour lutter contre l'érosion de la biodiversité.

Sous la pression de l'activité humaine, les milieux naturels et les espèces qui les peuplent sont soumis à un déclin sans précédent. Plus de 75 % de la surface terrestre a déjà été altérée par l'homme qui a déclenché la sixième grande crise d'extinction en accélérant de manière vertigineuse, le processus de disparitions d'espèces, la dernière datant de celle des dinosaures, il y a 65 millions d'années.

Les cinq causes majeures d'atteinte à la biodiversité sont aujourd'hui identifiées et détaillées dans le dernier rapport de Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques

(IPBES, 2019): 1) la destruction, dégradation et fragmentation des milieux naturels liées, en particulier, à l'urbanisation croissante, au développement du tourisme, à l'expansion des terres agricoles et au développement des infrastructures de transport, de pêche et d'exploitation minière et forestière; 2) la surexploitation des espèces sauvages de plantes, de bois ou d'animaux et de leurs produits pour le commerce local ou international que vient renforcer leur commerce illégal; 3) les pollutions de l'eau, des sols et de l'air, d'origines industrielles, agricoles ou résultant d'usages domestiques; 4) l'introduction d'espèces exotiques envahissantes, et 5) les changements climatiques s'ajoutent aux autres causes ou les aggravent. Ils contribuent à modifier les conditions de vie des espèces, les forçant à migrer ou à adapter leur mode de vie, ce que toutes ne sont pas capables de faire.

Ces causes interagissent fréquemment, tels que les coraux ont fortement régressé dans certaines zones à cause de la pêche intensive, du réchauffement climatique et des pollutions. La France co-préside, aux côtés du Costa Rica, une coalition internationale qui porte l'objectif de protéger 30% des aires terrestres et maritimes d'ici 2030. La biodiversité constitue l'axe majeur de l'Agenda 2030 des Nations-Unies pour le développement durable.

Les Objectifs de Développement Durable 15 et 14 qui concernent la préservation des écosystèmes terrestres et marins, ciblent directement la biodiversité, mais aussi la préservation et la restauration de la biodiversité. Seuls 4 % des aires marines protégées disposent aujourd'hui d'une protection forte, contre un objectif de 10% qui devait être atteint en 2022. La Cop15 Biodiversité de septembre 2022 en Chine, a eu pour objectif soutenu par 90 pays, la protection de 30 % des terres et de 30% des océans d'ici à 2030 au niveau mondial, contre 17% de la surface terrestre et 7 % des zones marines et côtières en 2020. L'ensemble de ces mesures conduira progressivement au développement de la photosynthèse artificielle pour augmenter les stocks des ressources naturelles renouvelables tout en réduisant les exportations des pays débiteurs vers les pays créditeurs des ressources écologiques durables (Figure 17).

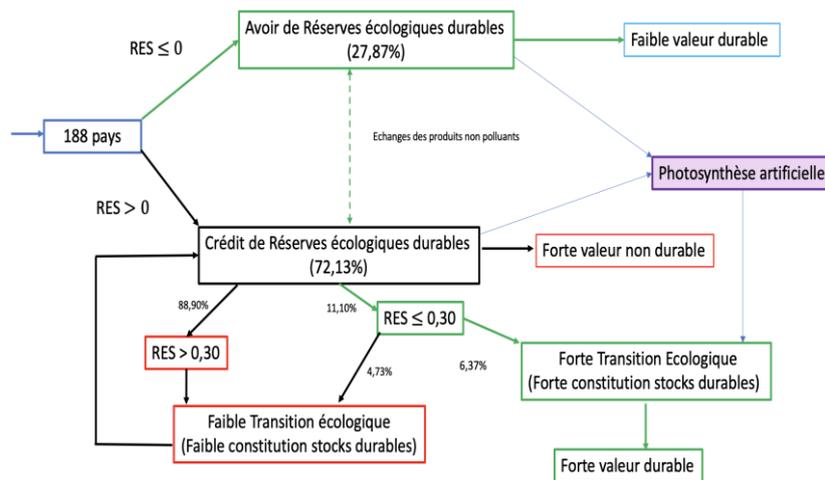


Figure 17 : Profils du risque écologique soutenable (RES) de 188 pays en 2021 en quête de la valeur durable.

Mais, le financement de ces objectifs oppose depuis la Cop 14, les représentants de l’Afrique, de l’Inde et de l’Amérique à ceux des pays industrialisés. Les premiers exigent au moins 100 Mds \$ par an dans un premier temps, puis 700 Mds \$ par an d’ici 2030 et au-delà, alors que pour les seconds, le financement ne sera que 200 Mds \$. Le maintien de la résilience de la biodiversité et des services écosystémiques à l’échelle mondiale dépend de la conservation efficace et équitable d’environ 30 à 50 % des forêts et des eaux planétaires.

4. CONCLUSION

La mesure du risque écologique soutenable à partir de l’approche de la sobriété environnementale tente de concilier la sobriété énergétique et la sobriété écologique autour de l’interaction entre l’empreinte carbone et l’empreinte écologique. L’empreinte carbone étant une partie intégrante de l’empreinte écologique, ce dernier concept traduit la quantité de carbone en surface de forêt nécessaire pour séquestrer les émissions de dioxyde de carbone. Plus le PIB par habitant d’un pays est élevé plus le déficit écologique est fort. Dans ce cas, la création des richesses est dynamisée par l’importation des biocapacités ou des ressources rares combinées aux siennes et la liquidation des actifs écologiques moyennant l’émission des déchets de dioxyde de carbone dans l’atmosphère. Plus le PIB par habitant est faible plus le crédit écologique est élevé. Le risque écologique soutenable est le déficit écologique momentané pour créer les richesses durables. Lorsque ce risque devient structurel, la constitution des stocks de ressources renouvelables nécessite le

rétablissement de la sobriété environnementale plus par des procédés bioénergétiques artificiels que des procédés d’adaptation. Dans ce cadre, la photosynthèse artificielle est une voie promettante pour rétablir l’équilibre écologique et réaliser une valeur durable.

Cette mesure du risque écologique montre que les perspectives d’une gestion résiliente des risques environnementaux seront de plus en plus limitées si les émissions des GES ne diminuent pas rapidement et si les financements des risques de Désertification et de destruction des écosystèmes n’augmentent. L’opérationnalisation de la sobriété environnementale nécessite la maîtrise de la photosynthèse artificielle pour produire des énergies, des mines et des hydrocarbures durables.

L’homme pourra réaliser des économies renouvelables, impulser la transition énergétique et atteindre la neutralité carbone, grâce au moteur à énergie renouvelable. Ces économies qui nécessitent le changement des habitudes de production et de consommation des énergies, sont une nouvelle piste qui reste à explorer par les trois catégories de Cop. Le financement des technologies basées sur la photosynthèse artificielle est une opportunité pour sauver l’humanité du risque écologique. Les pays en voie de développement y trouveront une sérieuse opportunité de prendre le leadership des énergies propres.

5. REFERENCES

5.1 OUVRAGES

Bown H.R. (1953): *Social Responsibilities of the Businessman*, New York, Harper & Row, 1953

Igalens J., G. J. (2008). *La responsabilité sociale de l'entreprise*. Paris: PUF.

Freeman R.E., (1984). *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. New York: Pitman.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139192675>

5.2 REVUES

Brandt, M., Wigneron, JP., Chave, J. et al. Satellite passive microwaves reveal recent climate-induced carbon losses in African drylands. *Nature Ecology & Evolution*, vol 2, 827–835 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41559-018-0530-6>

Bonet, D. ., & Lissillour , R. . (2023). Regards croisés sur la digitalisation, le développement durable et la gestion des ressources humaines dans la supply chain. *Revue Française De Gestion Industrielle*, 37(1), 3–6.
<https://doi.org/10.53102/2023.37.01.1178>

Crainer, S., & Dearlove, D. (2003). Windfall economics. *Business Strategy Review*, 14(4), 68-72.
<https://doi.org/10.1111/j.2003.00288.x>

Derrouiche, R., Fernandes, V. ., Naoui-Outini, F. ., & Saikouk , T. (2023). Les collecteurs de 40 + 1 de recherche en gestion industrielle, : Tome 1 : les articles précurseurs. *Revue Française De Gestion Industrielle*, 37(3), 03–08.
<https://doi.org/10.53102/2023.37.03.1198>

Fabbe-Costes , N. (2023). Développement durable : analyse rétrospective des articles précurseurs. *Revue Française De Gestion Industrielle*, 37(3), 09–16.
<https://doi.org/10.53102/2023.37.03.1200>

Grazi F et al. (2007). « Welfare economics versus ecological footprint: modeling agglomeration, externalities and trade ». *Environment and Resource Economics* n°1, vol.38, 135-153.
<https://dx.doi.org/10.1007/s10640-006-9067-2>

Lin D.et al. (2018). Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts. *Resources* , vol. 7, n°3, septembre, 58. *Resources* 2018, 7, 58.
<https://doi.org/10.3390/resources7030058>

Meichtry, D., Berretta, D., & Colchester, M. (2009). Italy quake rescue extends to artwork. (E. Edition, Éd.) *Wall Street Journal*, 253(81), pp. 7-8.

Newman P.N. (2006): « The environmental impact of cities ». *Environment and Urbanization*, volume 18, n°2, octobre, 275-295.
<https://doi.org/10.1177/0956247806069599>

Rees, W.E. (1992) Ecological Footprint and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves out. *Environment and Urbanization*, 4, 121-130.
<http://dx.doi.org/10.1177/095624789200400212>.

5.3 WEEB

AIE (2019):

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf>

Rapport du GIEC-2022-Enjeux-et-conclusions du dernier volet. https://greenly.earth/blog/actualites-ecologie/rapport-du-giec-2022-enjeux-et-conclusions-du-dernier-volet?utm_term=&utm_campaign=perf-max-fr&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=&gclid=CjwKCAjw4ayUBhA4EiwATWYBrjcllVRrJMFi_mRin4kI2IkQjOQTwa1aexNWLeCL5BoWfx8Z1905MBoC8SoQAvD_BwE

Global, Footprint Network (2022).
<https://data.footprintnetwork.org/#/>

CDP (2021) : <https://cdp.net/en/data/scores>

Rapport Planète Vivante 2016:
<https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/rapport-planete-vivante-2016-deux-tiers-des-populations-de-vertebres-pourraient-disparaitre-dici#:~:text=Le%20Rapport%20Plan%C3%A8te%20Vivante%202016%20met%20plus%20particul%C3%A8rement%20l'accent,et%20d'%C3%A9rosion%20des%20>

6. BIOGRAPHIE



Emmanuel Okamba est Docteur habilité à diriger les recherches. Maître de Conférences, spécialiste de la finance, de la Comptabilité, du contrôle de gestion et de la gestion des ressources humaines.

 : <https://orcid.org/0000-0002-9316-0251>

¹*Emmanuel Okamba*, Université Gustave Eiffel, Paris Est, Marne La Vallée, emmanuel.okamba@univ-eiffel.fr,

In Press, Journal Pre-proof*