

C R O N O S
F I N A N C E

Création d'un PIB durable
micro-fondé



Création d'un PIB durable micro-fondé

Think Tank Cronos 2020

Jeremy Dyens

Juillet 2020

Table des matières

Introduction	3
1. Un tour d’horizon sur les émissions de gaz à effet de serre	4
2. Pourquoi un PIB durable?	7
3. Modèle théorique	9
Les hypothèses	9
Le modèle	11
L'utilité indirecte et l'externalité du climat	12
Les données	13
Sélection des paramètres	14
4. Résultats empiriques	15
5. Cas pratique: évaluation financière d'une entreprise	19
Conclusion	21
Annexes	22
Annexe A : Figures additionnelles	22
Annexe B : Tableau additionnel	24
Annexe C : Développement de l'externalité du climat	25
Remerciements	27
Sources	27

Introduction

Les récentes manifestations pour le climat et les révoltes sociales vécues par certains pays amènent à la même conclusion : le modèle de croissance actuel a atteint certaines limites. Le réchauffement climatique est plus menaçant que jamais, tandis que les inégalités sociales continuent d'augmenter. La crise du COVID-19, par ailleurs, n'a pas joué en faveur de notre système capitaliste en montrant les limites et les risques de la mondialisation. Elle a cependant donné un répit à notre environnement : « les émissions de CO₂ sont liées au PIB. En temps de crise, on pollue moins », rappelle Sonia Seneviratne, professeure à l'EPFZ et climatologue. Ce virus nous a permis de ralentir le rythme pendant quelques mois et d'ainsi nous remettre en question sur les fondements de notre système : une remise en cause bienvenue dans un monde de plus en plus déchiré par les crises sociales et environnementales.

Cette étude cherche à comprendre et à appliquer les ajustements nécessaires à notre système économique. Partant de l'idée que notre idéal capitaliste s'appuie essentiellement sur une croissance « infinie », nous tentons de réconcilier celle-ci avec la crise climatique. Pour ce faire, nous adaptons le Produit Intérieur Brut (PIB), qui est l'indice le plus accepté comme mesure de croissance, pour prendre en compte l'**externalité négative** liée au climat¹. Nous décidons de nous focaliser sur les émissions de gaz à effet de serre (GES), car elles sont responsables du changement climatique qui lui représente le problème le plus important en termes de coûts imposés pour satisfaire les standards de durabilité². D'ailleurs, la crise actuelle du COVID-19 a montré que notre croissance actuelle génère trop d'émissions et les débats récents autour d'une taxe CO₂ ou de la crise climatique en général montrent l'intérêt grandissant du sujet.

Nous créons donc un PIB durable (appelé également PIB vert puisque cela fait référence à l'environnement) qui enlève à la production les dégradations que nos émissions provoqueront dans le futur. Pour justifier un tel ajustement, nous utilisons le concept du bien-être des individus. En effet, les individus se préoccupent du futur et l'ajustement est alors nécessaire pour mieux tenir compte de leur bien-être. De cette manière, nous ne cherchons pas à remettre complètement en cause notre système, mais plutôt à l'adapter vers une nouvelle forme de croissance³. Comme le répète le professeur et prix Nobel d'économie 2001 Joseph Stiglitz, la croissance du PIB ne se ferait plus aux dépens de l'environnement si les dégradations de l'environnement pouvaient être incluses directement dans cette mesure.

Nous introduisons d'abord le sujet avec une partie descriptive sur les émissions de gaz à effet de serre et sur les raisons de l'utilisation d'un PIB durable. Puis, nous développons un modèle théorique qui conduit à la justification de l'ajustement du PIB pour prendre en compte l'externalité négative liée au climat. Enfin, nous présentons les résultats empiriques et abordons un exemple plus pratique d'une évaluation financière d'une entreprise.

Une externalité est, par définition, l'impact des actions d'un individu sur d'autres individus. De plus, ces actions doivent être menées sans qu'il n'y ait de contrepartie monétaire. Le voisin qui fume sur sa terrasse ne commet aucune infraction. Cependant, il vous dérange et aggrave votre santé. Il y a donc une externalité négative de la fumée sur vous. Sur le même principe, les émissions de gaz à effet de serre représentent une externalité négative sur les générations futures. Comme le rappelle Stiglitz, les marchés n'attribuent aucun prix aux émissions de carbone. Pourtant, le monde est rapidement en train d'utiliser l'« espace carbone » disponible dans l'atmosphère. Il est grand temps, selon lui, que ceux qui utilisent cette ressource paient.

¹ Nous pourrions adapter le PIB pour tenir compte d'une quantité de facteurs différents, comme par exemple les inégalités, l'évolution des loisirs ou encore l'accumulation du capital. Cette étude est un exemple spécifique de la méthodologie pour ce genre d'ajustement. Elle est donc adaptable à d'autres externalités.

² Gerlagh et al. (2002).

³ Roulet et Bothello (2020).

1. Un tour d'horizon sur les émissions de gaz à effet de serre

La situation actuelle du stock de carbone dans l'atmosphère est déjà alarmante. Selon le rapport Stern de 2007 de l'économiste britannique du même nom (également membre de la commission de Stiglitz), il faudrait le stabiliser entre 950 et 1'200 **Gigatonnes de Carbone** (GtC – 10^9 tonnes) pour atteindre un réchauffement climatique de 2 à 3°C au-dessus de la température de l'ère préindustrielle⁴. Cependant, nous avons déjà stocké plus de 960 GtC (avec une augmentation moyenne de 5,3 GtC par année). Par ailleurs, la planète pourrait absorber au maximum 1,4 GtC par année tout en stabilisant le stock de carbone, alors que nous émettons au niveau mondial plus de 13 GtC par année. Sans surprise, la Chine et les Etats-Unis sont les deux

Quelle est la différence entre tonne de carbone (tC) et tonne de CO₂ (tCO₂) ? 1 tC représente 3,667 tCO₂, car la molécule de carbone seule est moins lourde que le dioxyde de carbone qui contient en plus de l'oxygène. Notre modèle utilise les tC mais les tCO₂ sont plus souvent mentionnées dans l'actualité. De plus, les autres gaz à effet de serre sont souvent exprimés en tonne équivalente de CO₂ (tCO₂eq). La conversion se fait via le potentiel de réchauffement global de chaque gaz.

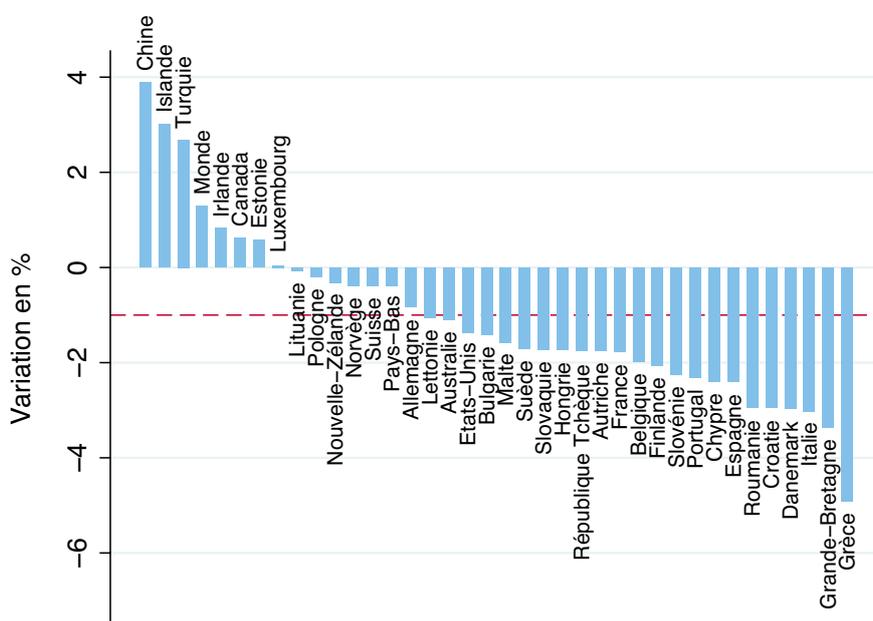
principaux émetteurs de GES. Le Tableau B.1 de l'annexe présente la part des émissions d'un pays par rapport aux émissions mondiales pour une bonne partie des pays de l'OCDE ainsi que de la Chine. En termes d'émissions par habitant (Figure A.1 de l'annexe), pour le même échantillon de pays, nous trouvons l'Australie (avec plus de 6 tC par habitant), les Etats-Unis et le Canada comme principaux émetteurs, tandis que la Chine (2,4 tC par habitant) se trouve en dessous de la moyenne de l'échantillon de 3 tC par habitant, tout comme la Suisse (1,8 tC par habitant). Stern rappelle qu'il est essentiel pour chaque pays de réduire ses émissions d'au minimum 1% par année pour atteindre l'objectif d'un réchauf-

fement climatique de 3°C (et de 5% par année pour l'objectif des 2°C). La Figure 1 montre le changement annuel moyen des émissions pour chaque pays entre 2008 et 2016. La plupart des pays de l'OCDE ont atteint cet objectif. Cependant, au niveau mondial, les émissions augmentent encore en moyenne de plus de 1% par année, portées par les pays qui polluent le plus. La Figure A.2 de l'annexe montre les variations en % pour les pays les plus pollueurs. Nous remarquons alors que ce sont principalement les pays en voie de développement qui tirent la croissance des émissions vers le haut. La Figure A.3 de l'annexe montre d'ailleurs que les émissions mondiales n'ont cessé d'augmenter depuis 2001 (à part en 2009). Enfin, au niveau des secteurs, en 2014, c'est l'approvisionnement en énergie (électricité et chauffage) qui représente la plus grande part des émissions (29,3%), puis viennent les transports sans l'aviation (19,5%) et l'industrie (19%). L'agriculture représente 11% et l'aviation 3%.

Toujours selon l'étude de Stern, les coûts liés à l'augmentation de la température de 2 à 3°C s'élèveraient entre 0 et 3% du PIB mondial par année tandis qu'un réchauffement de 5 à 6°C provoquerait des pertes de 5 à 10% du PIB mondial. Ces coûts incluent la fonte des glaciers, la baisse du rendement des cultures, l'augmentation de la mortalité liée à la malnutrition ou à des maladies (telles que le COVID-19), l'augmentation du niveau de la mer qui menacera entre autres Tokyo, New York, Le Caire et Londres, l'affaiblissement des écosystèmes avec 15 à 40% des espèces menacées ainsi que des changements météorologiques tels que les phénomènes liés à la mousson, au courant côtier El Niño ou encore à l'assèchement de la forêt amazonienne. Des efforts sont bien sûr possibles : cela coûterait 1% du PIB par année pour stabiliser le niveau du stock de carbone. Cependant, si des actions ne sont pas immédiatement prises, le coût pour atteindre ces objectifs augmentera automatiquement et l'objectif des 1'200 GtC sera alors hors d'atteinte.

⁴ A noter que, quand le sujet du réchauffement climatique (de 1°C par exemple) est abordé dans l'actualité, c'est toujours en rapport à l'ère préindustrielle.

Figure 1: Variation annuelle moyenne des émissions entre 2008 et 2016



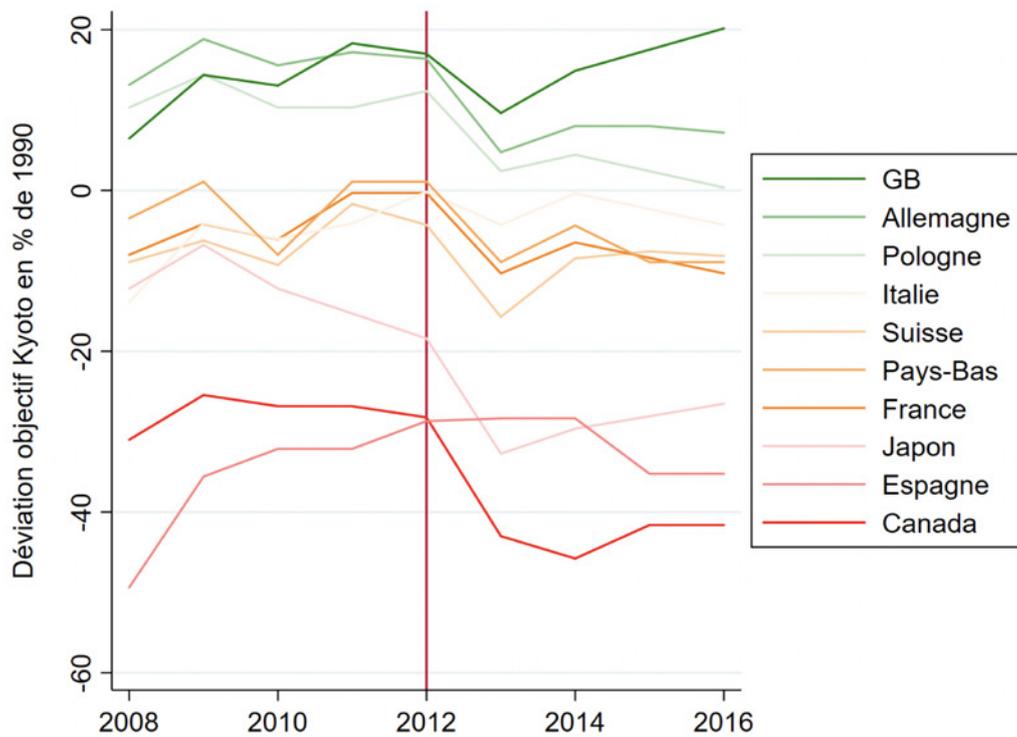
Source : l'Agence Néerlandaise de l'Environnement pour les émissions mondiales, de la Chine et des Etats-Unis et l'OCDE pour les émissions des autres pays. La ligne rouge représente une baisse annuelle moyenne de 1 %.

Au niveau de la coopération internationale, nous pouvons citer le protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005 et élaboré durant la COP3. 37 pays industrialisés, dont la Suisse et les pays de l'Union Européenne, s'étaient fixés un objectif moyen de réduction de 5 % des émissions par rapport à 1990 pour la période 2008 à 2012 avec des cibles individuelles différentes. En 2012, ils ont signé l'amendement de Doha au protocole de Kyoto (qui n'est jamais entré en vigueur) avec pour objectif moyen 18% de réduction par rapport à 1990 pour la période 2013 à 2020. La Figure 2 présente les déviations en pourcentage de 1990⁵ par rapport aux objectifs individuels de ces deux arrangements. Pour l'échantillon sélectionné, seules la Grande-Bretagne, l'Allemagne et la Pologne ont satisfait leur objectif, ce qui montre bien la difficulté du respect

des objectifs internationaux. Enfin, à Paris, durant la COP21 qui s'est tenue en 2015, les pays ont renforcé l'objectif de limiter la hausse de température à 1,5°C. Ils ont formulé des nouveaux objectifs : par exemple, la Suisse vise à réduire ses émissions de 50% par rapport à 1990 en 2030, tandis que l'UE vise 40% de baisse. Les états se sont engagés de manière juridiquement contraignante à informer au niveau international leur objectif de réduction d'émissions tous les cinq ans. Cela engage donc chaque pays, au minimum, à formuler des objectifs sur ses émissions et à respecter les conditions affiliées à ceux-ci (quantifiables, clairs, ambitieux, ...). Cependant, la réalisation des objectifs n'est toujours pas contraignante.

⁵ Par exemple : assumons que les émissions en 1990 s'élevaient à 10 GtC et qu'en 2016, elles s'élevaient à 8 GtC. Alors, si nous écrivons les émissions de 2016 en pourcentage de 1990, nous trouvons 80%. La réduction se monte à 20% de 1990 et si l'objectif est à 10%, la déviation vaut 10%.

Figure 2: Déviation objectif de Kyoto en % de 1990



Source : l'Agence Néerlandaise de l'Environnement pour les émissions et les Nations Unies pour les objectifs
 La barre verticale en 2012 représente les changements d'objectif suite à l'amendement de Doha. Si un pays a +5% et que son objectif était 8% de réduction, cela signifie qu'il a réduit ces émissions de 13% par rapport à 1990. La Pologne, le Japon et le Canada ont fixé leur objectif de réduction des émissions pour la période 2008-2012 à 6% par rapport à 1990, tandis que les autres pays ont fixé à 8%. Pour la période 2012-2016, nous utilisons l'objectif moyen de l'amendement de Doha de 18% pour tous les pays.
 GB pour Grande-Bretagne.

En conclusion, la situation actuelle liée au climat est grave et des actions rapides et efficaces sont primordiales. Un consensus international de réduction des émissions se met en place, mais le respect des objectifs reste très incertain. C'est pourquoi des mesures objectives de l'impact environnemental sont nécessaires afin d'aider les états et les acteurs économiques à prendre de meilleures décisions.

2. Pourquoi un PIB durable ?

Avant de présenter le modèle, nous pouvons nous interroger sur l'utilisation du PIB et se demander pourquoi il est nécessaire de l'adapter.

L'idée de base du PIB est la suivante : si nous produisons, nous créons de la valeur ajoutée bénéfique pour les entreprises. De plus, d'une manière ou d'une autre, cette valeur se retrouvera dans les mains des agents économiques qui pourront alors se permettre de consommer. Ainsi, si le PIB croît, le bien-être des individus peut également croître, même si certains ajustements ou certaines redistributions sont nécessaires. Le PIB, sur la base de ces arguments, peut être ainsi utilisé comme mesure de progrès économique (la santé financière d'un pays) et social (le bien-être des gens). Le PIB permet également de résumer une grande quantité d'informations dispersées en une seule variable facilement interprétable. Celle-ci est d'ailleurs largement acceptée au niveau international, ce qui permet de comparer les pays entre eux. C'est pourquoi le PIB est très utilisé dans les politiques économiques des états ou dans les stratégies d'investissement des entreprises.

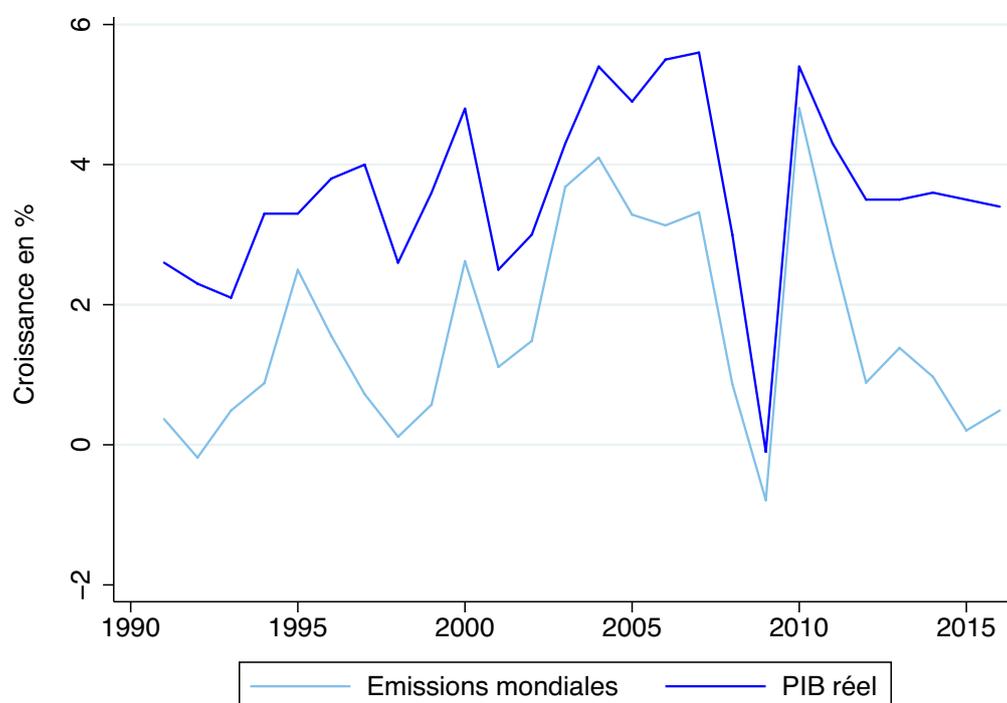
Il est cependant vivement critiqué à l'heure actuelle. L'affront vient notamment de la commission de travail de Stiglitz qui remet en cause cette mesure dans ses papiers de 2009 et 2018. Selon cette commission, nous avons les moyens d'adapter ou changer cette mesure et il est nécessaire de le faire si nous ne voulons pas que les décisions basées sur cet indice continuent à être biaisées. Les crises actuelles ont prouvé que nos mesures ne vont pas toujours dans le sens de la perception du bien-être. Notamment, la société est de moins en moins axée sur la consommation et de plus en plus sur l'environnement et l'égalité des personnes. Il est également important de présenter des chiffres de croissance qui ne se font pas au détriment des générations futures. La Figure 3 montre que le PIB est très corrélé aux émissions de GES. Plus nous produisons, plus nous émettons et plus le réchauffement climatique provoqué par ces émissions détruira des ressources dans le futur. D'une certaine manière, c'est comme si nous volions des ressources aux générations futures. Il paraît clair sur ces constats que cela ne peut

pas continuer ainsi. Le PIB est une mesure attrayante de par sa simplicité, mais le monde est devenu complexe et nous n'avons pas d'autres choix que d'inclure d'autres éléments pour évaluer la santé d'un pays.

De nombreux économistes ont alors tenté d'élaborer de nouvelles mesures. En premier, ils cherchaient principalement à ajouter au PIB la valeur des loisirs ou du travail non payé. Par exemple, nous pouvons mentionner la Mesure du Bien-être Economique (MBE) de Nordhaus et Tobin (1972). Puis, ils se sont intéressés à l'environnement et aux inégalités. Par exemple, il y a l'Indicateur de Progrès Véritable (IPV)⁶ qui enlève au PIB, entre autres, la valeur des inégalités et des dégâts à l'environnement. Cependant, la méthodologie utilisée n'est pas suffisamment transparente et est basée sur des éléments subjectifs. Ces mesures sont donc très peu utilisées à l'heure actuelle. Au niveau international, les pays membres des Nations Unies (NU) ont adopté en 2015 l'agenda pour le développement durable qui a notamment comme point central les objectifs de développement durable (ODD ; en anglais : *Sustainable Development Goals* ou SDGs). Cela inclut 17 objectifs de croissance durable avec notamment la réduction de la pauvreté, l'amélioration de la qualité d'éducation, la diminution des inégalités, la préservation de l'environnement mais également des objectifs de croissance économique. L'évaluation d'un pays peut désormais se faire selon ces critères en les agrégeant avec différents poids ou en les observant individuellement. A nouveau, le défi de cette approche est de savoir quelle importance donner à quel objectif et surtout, d'utiliser des critères objectifs. Il paraît donc clair qu'il y a encore de la marge de manœuvre pour développer une mesure plus durable reconnue internationalement.

⁶ Redefining Progress (1995).

Figure 3: Croissance du PIB réel et des émissions mondiales



Source : l'Agence Néerlandaise de l'Environnement pour les émissions et le FMI pour la croissance du PIB réel.

L'intérêt d'un PIB durable peut également se justifier directement d'un point de vue de l'investissement. Les prédictions de croissance du PIB sont souvent utilisées pour actualiser des cash-flows loin dans le futur. Ce genre de modèle se base sur le fait, qu'après une certaine date, il est difficile de prédire l'évolution des rentrées financières et qu'utiliser la croissance du PIB est une simplification suffisante. Pour cette problématique, ajouter un élément de long terme tel que l'externalité du climat paraît essentiel. Ces cash-flows loin dans le futur ont de fortes chances d'être impactés par les problèmes climatiques.

3. Modèle théorique

Enlever l'externalité négative liée au climat ne peut pas se faire de manière arbitraire. Pour créer un PIB durable, il faut donc se baser sur un modèle économique standard. En effet, ce genre de modèle utilise des hypothèses acceptées par la communauté scientifique et son utilisation est plus que répandue dans les milieux économiques, financiers et politiques. Nous expliquons dans cette section le modèle et justifions ensuite l'ajustement nécessaire pour tenir compte de l'externalité du climat.

Nous utilisons le modèle d'équilibre général dynamique stochastique (EGDS) avec une externalité liée au changement climatique de Golosov et al. (2014)⁷. L'objectif est de trouver une mesure qui représente mieux le bien-être global des individus. Vu que les consommateurs se préoccupent du futur (pour leurs enfants ou leur retraite), il est primordial d'incorporer de la durabilité dans notre mesure. Nous développons donc une équation liant le PIB et l'externalité du climat au bien-être.

Les hypothèses

- Une période (l'indice t) représente 10 ans, car le cycle du carbone a une longue durée et les dommages sur l'économie dus au changement climatique ne se matérialisent pas en une année.
- Les variables liées au climat ont pour unité les GtC.
- Chaque variable est calculée à l'échelle mondiale, c'est-à-dire agrégée à travers tous les pays du monde.
- La satisfaction du consommateur ou le bien-être est représenté par une fonction appelée l'utilité :

$$U(C_t) = \log(C_t)$$

avec C_t , la consommation en quantité de biens à la période t de l'agent représentatif⁸. Plus l'utilité est haute, plus le consommateur est satisfait. Il existe une grande littérature sur le choix de la bonne forme d'utilité mais nous choisissons ici une forme logarithmique standard. La fonction logarithmique est monotone croissante et concave. Donc, plus la consommation augmente, plus l'agent est satisfait. Cependant, l'augmentation de sa satisfaction est de plus en plus faible (valeur marginale de la consommation décroissante). Seule la consommation apporte du bien-être dans ce modèle. Il existe des modèles où les loisirs ou le travail sont également incorporés dans la fonction d'utilité, mais puisque nous nous intéressons aux dommages provoqués par le changement climatique sur la production, il n'est pas nécessaire d'inclure ces éléments.

- Un seul secteur produit de l'énergie, E_t (évalué en GtC) et la fonction de production s'écrit :

$$E_t = A_t L_t$$

avec A_t , le niveau de technologie dans l'économie et L_t , la main d'œuvre. Par exemple, nous pourrions considérer que ce secteur représente l'industrie du charbon ou du pétrole. Il est facile de généraliser le modèle pour inclure plusieurs secteurs⁹.

⁷ Ce modèle a pour but de trouver une équation optimale, au niveau global, pour la taxe sur le CO₂.

⁸ L'hypothèse de l'agent représentatif est basique. Nous supposons que tous les agents ont les mêmes préférences et les mêmes contraintes.

Cela ne correspond bien sûr pas à la réalité, mais cela permet de considérablement simplifier les calculs.

⁹ Également, nous pourrions supposer que cette énergie peut être produite en ressource limitée. Cela n'influencerait pas le modèle.

- La production du bien de consommation, Y_t , se fait en utilisant uniquement de l'énergie et est impactée par le réchauffement climatique de la manière suivante :

$$Y_t = (1 - D(S_t))E_t = \underbrace{e^{-\gamma_t(S_t - \bar{S})}}_{< 1} E_t$$

L'hypothèse d'un facteur de production est très forte, car cela veut dire que, pour produire, l'entreprise n'a ni besoin de travailleurs, ni de la technologie, ni de machines (capital). Cependant, nous pouvons sans autre relâcher cette hypothèse sans changer l'ajustement au climat. Cela alourdirait simplement les notations. Cette énergie, quand elle est produite, émet des gaz à effet de serre qui vont augmenter la température de la planète et réduire les rendements de la production. Dans la partie $D(S_t)$, qui modélise les dommages liés au climat, S_t représente la quantité de carbone dans l'atmosphère à la période t , tandis que \bar{S} représente la quantité pendant l'ère préindustrielle. γ_t est un paramètre important : il transforme ce stock en dommages sur la production. Il nous permet de calibrer l'ampleur des dommages. Puisque l'exponentiel est négative, la partie liée aux dommages est plus petite que 1. Seule une fraction de ce que vous utilisez comme énergie se transforme en bien final et plus le stock de carbone dans l'atmosphère est important, moins votre rendement en termes de production est bon.

- Le stock de carbone dans l'atmosphère évolue de la manière suivante :

$$S_t - \bar{S} = \sum_{s=0}^{t+T} (1 - d_s) E_{t-s}$$

$$\text{avec } (1 - d_s) = \varphi_L + (1 - \varphi_L)(1 - \varphi_0) * 0 + (1 - \varphi_L)\varphi_0(1 - \varphi)^s$$

Cette fonction indique que le stock de carbone au temps t est la somme de toutes les émissions de GES entre l'ère préindustrielle et aujourd'hui. Les émissions sont multipliées par le terme $(1 - d_s)$ qui représente le cycle du carbone. Une partie φ_L reste dans l'atmosphère pour toujours. Une autre part, $(1 - \varphi_L)(1 - \varphi_0)$, disparaît en 10 ans et donc immédiatement dans ce modèle (d'où la multiplication par zéro). Cette part est captée par la biosphère (les arbres, ...) et les couches supérieures des océans. La dernière partie, $(1 - \varphi_L)\varphi_0$, descend très lentement dans les profondeurs des océans à un rythme φ . Cette équation linéaire est bien sûr une grande simplification du cycle du carbone, mais elle permet d'avoir des résultats très intuitifs.

Le modèle

Les consommateurs

Les consommateurs cherchent à maximiser leur bien-être et donc à maximiser $U(C_t) = \log(C_t)$. Ils ne peuvent pas consommer à l'infini. Ils doivent respecter leur contrainte budgétaire : $P_t C_t = W_t L_t$, i.e. les dépenses liées à la consommation (où P_t représente le prix des biens) sont égales aux revenus (le salaire, W_t , multiplié par les heures travaillées, L_t). L'objectif désormais est d'essayer de lier la consommation, qui apporte du bien-être à l'individu, au PIB.

Les producteurs

Le secteur lié à l'énergie cherche à maximiser ses profits en choisissant L_t :

$$\pi_{t,E} = P_{t,E} E_t - W_t L_t$$

A l'optimum, en se rappelant que $E_t = A_t L_t$, nous trouvons $P_{t,E} A_t = W_t$. En substituant ce résultat, nous trouvons que le revenu total d'un individu est égal à $W_t L_t = P_{t,E} A_t L_t = P_{t,E} E_t$.

Le secteur lié à la production du bien final maximise ses profits en choisissant E_t qu'il paie $P_{t,E}$:

$$\pi_t = P_t Y_t - P_{t,E} E_t$$

A l'optimum, en se rappelant que $Y_t = e^{-\gamma_t(S_t - \bar{S})} E_t$, nous trouvons $P_t e^{-\gamma_t(S_t - \bar{S})} = P_{t,E}$. Si nous substituons ce résultat dans le revenu total de l'individu, nous trouvons :

$$W_t L_t = P_{t,E} E_t = P_t e^{-\gamma_t(S_t - \bar{S})} E_t = P_t Y_t$$

Ainsi, nous trouvons, d'une part grâce à la contrainte budgétaire du consommateur et d'autre part aux conditions d'optimalité d'équilibre, que la consommation est égale à la production, $C_t = Y_t$. Ceci est très intuitif : au niveau mondial, tout ce qui est produit est consommé dans la même année s'il n'y a pas moyen d'épargner (pas de capital)¹⁰.

Le cycle du carbone

Pour simplifier les calculs, nous séparons la variable S_t en deux stocks $S_{1,t}$ et $S_{2,t}$. Le premier représente le stock qui reste dans l'atmosphère pour toujours, tandis que le second représente le stock qui disparaît lentement dans les océans. Nous pouvons alors représenter le stock de carbone sous forme récursive :

$$\begin{aligned} S_{1,t} &= S_{1,t-1} + \varphi_L E_t \\ S_{2,t} &= (1 - \varphi) S_{2,t-1} + (1 - \varphi_L) \varphi_0 E_t \\ S_t &= S_{1,t} + S_{2,t} \end{aligned}$$

¹⁰ Encore une fois, ajouter du capital n'aurait pas changé fondamentalement l'intuition. Nous aurions trouvé $C_t + K_t + I_t = Y_t$ et la consommation aurait simplement été une fraction de la production totale.

L'utilité indirecte et l'externalité du climat

Nous pouvons désormais nous intéresser à l'évolution du bien-être des gens. L'objectif de cette étude est de créer une mesure qui prend mieux en compte le bien-être des individus et nous voulons faire ceci en lien avec l'environnement. Nous avons expliqué que l'individu tirait sa satisfaction de la consommation et que celle-ci était étroitement liée à la croissance du PIB. Maintenant, pour amener de la durabilité dans notre mesure économique, il ne faut pas simplement s'intéresser à la satisfaction d'un individu aujourd'hui mais également à sa satisfaction pour les périodes futures. Rappelons encore une fois que les gens se préoccupent de plus en plus de leur futur et donc qu'il paraît normal d'inclure des éléments de long terme dans la mesure du bien-être. Pour ce faire, nous pouvons utiliser un concept économique utile : l'utilité indirecte¹¹. Cela représente le maximum de la satisfaction totale (à travers toutes les périodes) obtenue par un agent au cours d'une année donnée. L'avantage est que cette fonction ne dépend que des variables de stock du modèle, i.e. les variables qui représentent une quantité s'accumulant dans le temps et qui sont mesurables à un moment donné (à l'inverse des variables de décision, qui sont choisies en référence à la période et qui ne s'accumulent pas). Dans notre cas, l'utilité indirecte s'écrit sous forme récursive de la manière suivante :

$$V_t(S_{t-1}) \equiv \max[\log(C_t) + \beta \mathbb{E}_t V_{t+1}(S_t)]$$

En effet, comme notre seule variable de stock est la quantité de carbone dans l'atmosphère, nous savons que l'utilité indirecte ne dépend que de cette variable¹². La forme récursive nous permet de simplifier considérablement la notation : cette équation prend en compte la satisfaction (utilité) actuelle, $\log(C_t)$, ainsi que toutes les satisfactions futures (prises en compte dans $\mathbb{E}_t V_{t+1}(S_t)$). Il est important de mentionner le facteur β qui représente le poids que nous donnons à l'utilité de la période suivante relativement à la

période en cours. Il est appelé le facteur d'escompte et correspond à la patience de l'individu. Plus il est élevé, plus le consommateur donne du poids aux futures utilités et donc plus il est prêt à attendre pour augmenter sa satisfaction. Un facteur d'escompte à zéro signifierait que l'individu ne s'intéresse pas aux futures périodes et que la seule chose utile est sa satisfaction aujourd'hui.

Cette équation, en quelque sorte, représente le bien-être global d'un individu. Elle inclut le principe de durabilité car elle prend en compte sa satisfaction future. Si la valeur de l'utilité indirecte augmente entre deux périodes, cela signifie que le bien-être augmente dans le temps. C'est pourquoi nous calculons comment cette fonction varie dans le temps en prenant sa dérivée¹³ et en se rappelant que $C_t = Y_t$:

$$\text{Variation du bien être} \left\{ \frac{\partial V_t(S_{t-1})}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{Y_t} \frac{\partial Y_t}{\partial t}}_{\text{Croissance PIB}} + \underbrace{\beta \mathbb{E}_t \frac{\partial V_{t+1}(S_t)}{\partial S_t} \frac{\partial S_t}{\partial t}}_{\text{Externalité du climat}} \right.$$

Cette équation est très importante. Elle montre premièrement que la croissance du bien-être est liée à la croissance du PIB. En effet, le premier terme n'est rien d'autre que la croissance du PIB réel. Plus celui-ci croît, plus le bien-être des individus augmente. Cela peut expliquer en partie pourquoi énormément d'économistes et d'acteurs politiques ont fait confiance au PIB comme approximation du bien-être des individus. C'est le résultat d'un modèle simplifié où l'agent représentatif ne tire de la satisfaction que de la consommation. Deuxièmement, cette équation montre que le PIB à lui seul n'est pas suffisant pour calculer la variation du bien-être. Il faut également ajuster pour ce que nous appelons l'externalité liée au climat. En effet, l'évolution du stock de carbone impacte la production des futures périodes et donc des consommations futures et l'externalité doit alors être prise en compte.

¹¹ Qui découle du Théorème du Maximum.

¹² A noter ici qu'au temps t , S_{t-1} est une variable de stock, car S_t est influencée par les émissions d'aujourd'hui.

¹³ Nous utilisons t comme un indice discret du temps et donc prendre la dérivée n'est pas mathématiquement correct, mais nous ignorons simplement ce problème.

Nous montrons dans l'annexe C le développement de l'externalité du climat. Nous présentons ici uniquement l'équation finale :

$$\text{Variation du bien être} \left\{ \frac{\partial V_t(S_{t-1})}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{Y_t} \frac{\partial Y_t}{\partial t}}_{\text{Croissance PIB}} - \underbrace{\bar{\gamma} \frac{\varphi_0 \beta}{1 - \beta} \frac{\varphi_0 (1 - \varphi_L) \beta (1 - \varphi)}{1 - \beta (1 - \varphi)}}_{\text{Externalité du climat}} E_t + \bar{\gamma} \frac{\beta (1 - \varphi)}{1 - \beta (1 - \varphi)} S_{2,t-1} \right\}$$

avec φ_0 , φ_L et φ , les paramètres du cycle de carbone, $\bar{\gamma}$, le dommage moyen et β , le facteur d'escompte. Ces fractions sont le résultat de la convergence de la somme des dommages futurs sur la production. Il est important de rappeler que t représente 10 ans et donc que nous nous intéressons à la croissance du PIB sur 10 ans. E_t , quant à elle, correspond à la somme des émissions sur 10 ans. Par ailleurs, la partie concernant $S_{2,t-1}$, le stock de carbone qui disparaît dans les océans, représente une très petite valeur et donc peut sans problème être ignorée. Cette équation représente la croissance du PIB durable. Nous enlevons au PIB la valeur actualisée des dommages futurs que notre production crée. Nous pouvons remarquer que l'ajustement varie uniquement à cause des émissions, E_t les autres éléments étant constants dans le modèle et $S_{2,t-1}$ n'influençant que marginalement.

Les données

Nous prenons la croissance du PIB réel sur la base de données du Fonds Monétaire International. Nous trouvons le PIB nominal sur le site de la Banque Mondiale. Le papier d'Olivier et al. (2017) de l'Agence Néerlandaise de l'Environnement reporte les émissions mondiales de GES ainsi que les émissions chinoises et américaines, tandis que les émissions pour les autres pays se trouvent sur le site de l'OCDE. Finalement, le stock de carbone est pris sur le site de l'Agence Européenne pour l'Environnement.

Sélection des paramètres

Cette partie explique comment les paramètres sont sélectionnés. C'est une partie descriptive du papier de Golosov et al. (2014) puisqu'ils se basent sur des simulations complexes liées au climat que nous n'avons pas les moyens de reproduire. Pour la patience des consommateurs, le facteur β , ils utilisent les valeurs de 0,985 (Nordhaus, 2008) et 0,999 (Stern, 2007). Il y a encore aujourd'hui un grand débat sur quelle est la valeur représentant le mieux le comportement des consommateurs. C'est pourquoi ils préfèrent analyser pour une très faible et une très grande valeur afin de ne pas prendre parti dans ce débat et d'obtenir une sorte d'intervalle de confiance. Pour le cycle du carbone, ils spécifient φ_L à 20% car, selon un rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), 20% des émissions restent dans l'atmosphère presque pour toujours. Pour le paramètre φ , ils se basent sur un papier d'Archer (2005) qui affirme que la part des émissions qui ne reste pas pour toujours et qui ne disparaît pas dans la biosphère, $(1 - \varphi_L)(1 - \varphi_0)$, a une espérance de demi-vie moyenne de 300 ans. Cela signifie que $(1 - \varphi)^{30} = 0,5$ et donc que $\varphi = 0,0228$. Finalement, le GIEC rapporte que la moitié de toutes les émissions de GES disparaît après 30 ans et donc $(1 - d_2) = 0,2 + 0,8\varphi_0(1 - 0,0228)^2 = 0,5 \Rightarrow \varphi_0 = 0,393$. Enfin, en se basant sur les données du stock de carbone, nous considérons S_0 comme le stock de carbone en 2000 (843 GtC)¹⁴ et séparons, comme dans Golosov et al., en S_1 et S_2 avec les proportions 85% (717 GtC) et 15% (126 GtC). Nous utilisons l'équation récursive définie dans le cycle du carbone pour calculer les valeurs du stock dès 2001¹⁵.

Au niveau du paramètre concernant les dommages, Golosov et al. simplifient considérablement la structure en spécifiant que $\bar{\gamma} = p\gamma^H + (1 - p)\gamma^L$. γ^H représente une situation où les dommages à la production sont catastrophiques et γ^L une situation où les dommages sont modérés. Les éléments qui suivent sont basés sur une étude de Nordhaus (2008). La probabilité du scénario catastrophique est fixée à 6,8%. Si nous nous trouvons dans ce scénario, alors un réchauffement de 6°C (correspondant à un stock de carbone dans l'atmosphère de 2'234 GtC) provoquera une perte globale de 30% du PIB. Si nous nous trouvons dans l'autre scénario, alors un réchauffement de 2,5°C (1'035 GtC) provoquera une perte globale de 0,48% du PIB. Ils appliquent ceci sur leur modèle. Pour rappel :

$$Y_t = (1 - D(S_t))E_t = \underbrace{e^{-\gamma_t(S_t - \bar{S})}}_{< 1} E_t$$

Ils en déduisent alors que $e^{-\gamma^H(2234-581)} = 1 - 0,3 = 0,7$ et que $e^{-\gamma^L(1035-581)} = 1 - 0,0048 = 0,9952$. Ils trouvent donc $\gamma^H = 2,046 \times 10^{-4}$, $\gamma^L = 1,060 \times 10^{-5}$ et $\bar{\gamma} = 2,379 \times 10^{-5}$.

¹⁴ Ce qui est la seule différence avec Golosov et al. qui calibrent le stock de carbone en 2000 à 802 GtC, mais sans se baser sur les données liées au stock de carbone.

¹⁵ Notons ici que la calibration est uniquement nécessaire car les données ne séparent pas le stock de carbone en deux sous-stocks. Notre calibration sous-estime le vrai stock de carbone de seulement 17 GtC sur les 953 GtC totales en 2016, ce qui est tolérable.

4. Résultats empiriques

Comme le modèle a pour unité de temps une décennie, nous comparons la période allant de 2007 à 2016 avec la période allant de 1997 à 2006. En utilisant le résultat développé dans la partie théorique, nous trouvons un ajustement négatif pour tenir compte de l'externalité de 0,8 point de pourcentage (β bas) et 8,7 points de pourcentage (β haut). En supposant que l'ajustement est identique chaque année¹⁶, nous trouvons un ajustement annuel de 0,1 point de pourcentage pour un facteur d'escompte β bas et de 1,1 points de pourcentage pour un facteur d'escompte β haut. Le facteur β augmente l'ajustement, car il augmente le poids donné aux futures périodes et donc, les dom-

mages futurs ont relativement plus d'importance. Par rapport à un PIB mondial de 75 milliards de dollars en 2015, cela représente 75 et 825 milliards.

En utilisant une croissance moyenne du PIB mondial de 3,57 % sur la période 2007-2016, nous trouvons une croissance moyenne de 3,46 % et 2,47 % pour le PIB durable (Tableau 1). Nous obtenons logiquement une croissance plus faible étant donné que les émissions impactent négativement le bien-être des individus. Ces résultats montrent que la croissance du bien-être, en lien avec l'environnement, a été relativement plus basse que ce que le PIB laissait croire.

Tableau 1 : Croissance annuelle moyenne du PIB mondial et durable en % entre 2007 et 2016

PIB	PIB durable – 10 ans			
	β bas – γ moyen	β haut – γ moyen	β bas – γ haut	β haut – γ haut
3,57	3.46	2.47	2.67	-9.45

	PIB durable – 1 an			
	β bas – γ moyen	β haut – γ moyen	β bas – γ haut	β haut – γ haut
	2,67	-5,12	-4,21	-71,17

β bas est égal à 0,985 alors que β haut à 0,999. γ haut correspond à un scénario où les dommages futurs s'avèrent être catastrophiques. Les scénarios avec des dommages modérés, γ bas, ne sont pas présentés, car les résultats sont similaires au cas moyen. γ moyen est la moyenne pondérée des deux scénarios : $\bar{\gamma} = p\gamma^H + (1 - p)\gamma^L$.

De plus, si la situation en termes de réchauffement climatique s'avérait être catastrophique (on évalue pour l'instant à 6,8 % la probabilité d'une telle situation, mais cette probabilité pourrait augmenter si nous ne prenons pas des mesures rapidement), la croissance moyenne du PIB durable chuterait à 2,67 % pour un facteur d'escompte β bas et même à -9,45 % pour un facteur d'escompte haut. Ce second résultat d'ailleurs pourrait complètement remettre en question

le système actuel. Cela signifierait qu'en moyenne, le monde n'a pas créé de croissance au cours de cette période et que le bien-être des consommateurs a continuellement baissé. Nous comprenons dès lors l'urgence de la situation. Si nous ne prenons pas des mesures rapides, la situation climatique s'aggravera tellement que la valeur actuelle des dommages futurs surpassera largement la croissance du PIB.

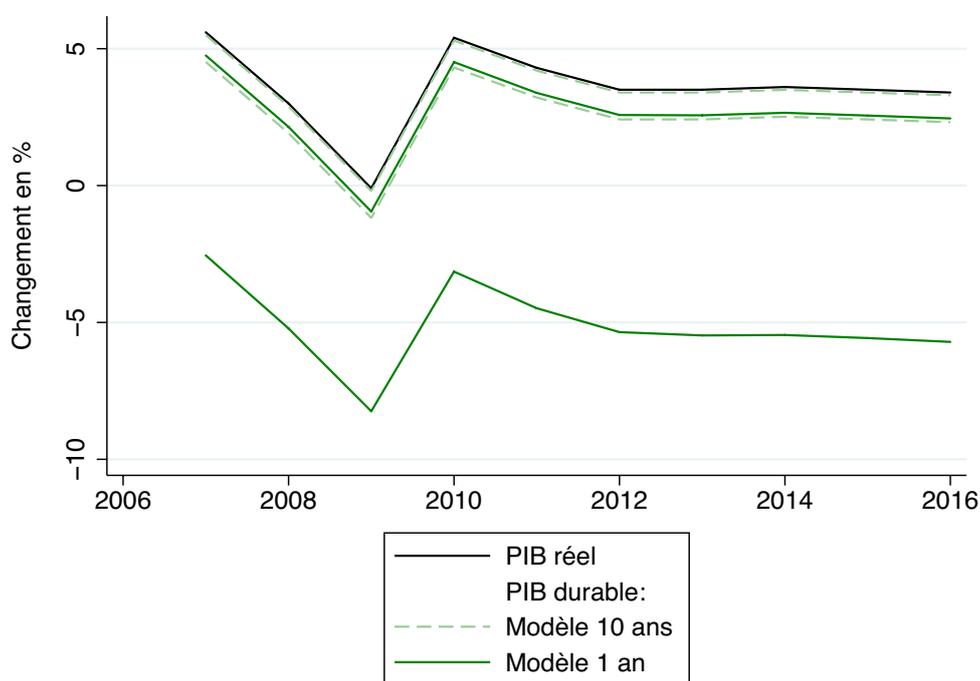
¹⁶ L'ajustement devrait être différent entre les années car les émissions diffèrent d'une année à l'autre. Cependant, cette hypothèse est raisonnable puisque la différence n'est pas grande ($\pm 0,1$ point de pourcentage).

Ces résultats montrent une grande disparité en termes de croissance. Selon la sensibilité que les consommateurs ont pour le futur et selon la probabilité que les dommages futurs soient catastrophiques, nous passons d'un système qui a eu une grande croissance positive entre 2007 et 2016 à un système qui a en moyenne détruit de la valeur. Cela soulève certaines questions. Le modèle actuel a-t-il réellement créé de la croissance telle que nous le pensions? Est-il possible d'arriver à un consensus international sur la mesure de croissance quand notre mesure diverge pareillement? Cette étude montre en tout cas que la croissance vécue jusqu'à aujourd'hui est plus subjective que nous pouvions le penser. Il est désormais primordial de trouver rapidement des réponses à ces questions afin d'utiliser le taux de croissance qui reflète au mieux la réalité.

Dans l'optique de rendre la mesure plus transparente, nous pouvons adapter le modèle pour une période de 1 année au lieu de 10. Le modèle sur 10 ans présente le

grand désavantage d'être moins intuitif et plus long à calculer. Nous pouvons donc supposer arbitrairement que t représente une année. Cependant, avec cette hypothèse, nous surestimons l'ajustement, car cela suppose que les dommages liés à l'environnement se réalisent dès la période suivante, c'est-à-dire dans une année au lieu de 10 ans initialement. La valeur actualisée sera donc plus grande. Nous résumons les différents résultats décrits ci-dessus dans le Tableau 1. La croissance du PIB durable passe à 2,67% et -5,21% selon le facteur d'escompte. Avec un modèle annuel, l'ajustement diffère d'une année à l'autre selon la valeur des émissions globales. La Figure A.4 de l'annexe montre cette évolution pour les deux facteurs d'escompte, β , entre 2001 et 2016. L'ajustement annuel fluctue entre 0,7 et 0,95 point de pourcentage pour le facteur d'escompte bas tandis qu'il fluctue entre 6,8 et 9 points de pourcentage pour le facteur d'escompte haut. Nous remarquons que la différence entre le modèle 10 ans et 1 an est très élevée.

Figure 4: Croissance du PIB réel et du PIB durable en % pour l'économie mondiale



Les deux courbes vertes du haut correspondent à un facteur d'escompte, β , bas, tandis que les deux du bas correspondent à un facteur d'escompte, β , élevé.

Il est possible de représenter la croissance du PIB durable graphiquement. Cela permet une interprétation plus intuitive des résultats. La Figure 4 présente les différents résultats expliqués ci-dessus sous forme graphique pour l'économie mondiale. Cela nous permet de voir à nouveau que le modèle annuel est plus sévère que le modèle par décennie et que l'ajustement augmente si le facteur β augmente.

Si nous nous intéressons à un pays en particulier, nous devrions ajuster notre modèle. Cependant, dans le cadre de cette étude, nous décidons de faire l'hypothèse simplificatrice que le modèle se transpose en un modèle par pays. Nous conduisons l'analyse pour la Suisse que nous reportons sur la Figure A.5 de l'annexe. La Suisse a eu une croissance moyenne sur la période 2007 à 2016 plus faible que le monde dans sa totalité. Avec l'ajustement, même le plus petit, nous nous rapprochons des 0% de croissance. Sur un PIB suisse en 2015 de 679 milliards de dollars, l'ajustement s'élève entre 0,7 (0,1%) et 7,5 (1,1%) milliards si nous reprenons les chiffres du modèle 10 ans. Il est important de comprendre que l'ajustement est calculé avec les émissions globales et non avec les émissions nationales. En effet, il n'y a pas de frontière dans l'atmosphère et donc, quand un pays émet des GES, il réchauffe la planète et impactera la production et le bien-être de tous les autres pays. C'est pourquoi ce sont les émissions mondiales qui importent et pas les émissions nationales. Cela pourrait paraître injuste d'ajuster le PIB d'un pays comme la Suisse qui pollue peu avec, par exemple, les émissions des Etats-Unis. Cependant, les émissions américaines réchaufferont toute la planète et la Suisse subira alors les mêmes incapacités à produire que les américains. L'ajustement peut différer entre les pays seulement si le facteur β ou $\bar{\nu}$ est différent. Par exemple, les consommateurs d'un pays pourraient être plus sensibles au futur qu'un autre pays. Cela impliquerait un β plus élevé et

donc un ajustement plus élevé. Egalement, un pays pourrait avoir une meilleure technologie pour gérer le réchauffement climatique (comme des cultures qui résistent à la chaleur). Ceci impliquerait un $\bar{\nu}$ plus faible et donc un ajustement plus faible. Le fait que la différenciation entre les pays ne peut se faire que par ces deux paramètres est un désavantage de notre méthodologie. Cependant, nous sommes au début de ce projet et il est fort probable que nous trouverons une solution prochainement.

Nous pouvons cependant évaluer les contributions de chaque pays dans l'ajustement lié à l'externalité du climat. Cela permet de pointer des responsabilités et de chiffrer, en dollars, les dommages actualisés causés par les émissions de chaque pays. Le Tableau 2 chiffre la contribution à la perte de PIB mondiale, provoquée par les émissions, de certains pays de l'OCDE en 2016 en utilisant le modèle 1 an.

La Chine par exemple aurait coûté entre 196 et 1'842 milliards de dollars à l'économie mondiale en 2016. Les Etats-Unis auraient également vu leur contribution s'élever à des centaines de milliards. Les émissions de la Suisse, quant à elles, coûteraient entre 0,8 et 7 milliards de dollars. Ces chiffres correspondent à la valeur des différentes taxes carbone que nous trouvons dans le monde. En Suisse, par exemple, la taxe s'élève à 96 francs par tonne de CO₂, ce qui est déjà très élevé. Le monde a émis 49,14 GtCO₂ en 2016 ce qui correspondrait à une valeur de 4'717 milliards de francs avec la taxe. La Chine, qui représente 26% des émissions, aurait donc une contribution de 1'226 milliards de francs et la Suisse (0,11%) de 5,2 milliards, ce qui est inclus dans notre intervalle. Nous comprenons donc que la taxe est calculée en suivant les mêmes principes. Elle correspond à une valeur actualisée des dommages futurs attendus.

Tableau 2 : Contribution 2016 à l'ajustement lié à l'externalité du climat en milliards de dollars

Pays	β bas γ moyen	β haut γ moyen	β bas γ haut	β haut γ haut
Chine	196	1'842	1'690	15'837
Etats-Unis	99	935	858	8'047
Allemagne	15	138	127	1'187
Canada	11	107	99	924
Australie	8	78	72	674
Grande-Bretagne	8	75	69	645
France	7	65	59	556
Italie	7	61	56	529
Espagne	5	47	44	408
Pays-Bas	3	31	28	265
Belgique	2	16	15	141
Autriche	1	10	9	88
Norvège	1	9	9	82
Finlande	0,9	9	8	75
Suède	0,9	9	8	74
Suisse	0.8	7	7	64

β bas est égal à 0,985 alors que β haut à 0,999. γ haut correspond à un scénario où les dommages futurs s'avèrent être catastrophiques. Les scénarios avec des dommages modérés, γ bas, ne sont pas présentés, car les résultats sont similaires au cas moyen. γ moyen est la moyenne pondérée des deux scénarios : $\bar{\gamma} = p\gamma^H + (1 - p)\gamma^L$. Pour obtenir ces chiffres, il faut multiplier les émissions de chaque pays par le PIB mondial en 2015 de 75 billions de dollars et par le coût marginal, du modèle 1 an, sur l'économie des émissions calculé dans le modèle théorique et présenté ci-dessous :

$$\bar{\gamma} = \frac{\varphi_0 \beta}{1 - \beta} - \frac{\varphi_0 (1 - \varphi_L) \beta (1 - \varphi)}{1 - \beta (1 - \varphi)}$$

5. Cas pratique : évaluation financière d'une entreprise

Nous nous intéressons dans cette section à un cas plus pratique de l'utilisation du taux de croissance du PIB. La méthodologie présentée est considérablement simplifiée par rapport à ce qui se fait dans la pratique. Comme expliqué ci-dessus, la croissance du PIB durable reflète mieux le bien-être des individus et cette mesure prend en compte les dommages futurs liés à l'environnement. Ainsi, d'une certaine manière, le taux de croissance du PIB durable reflète mieux le taux de croissance potentiel des PIB futurs. Il est important de comprendre que le PIB durable est une mesure au niveau macroéconomique et qu'elle ne peut en aucun cas différencier deux entreprises au sein d'un même pays.

Souvent, lorsque nous cherchons la valeur financière d'une entreprise, nous utilisons la méthode d'actualisation des flux de trésorerie. Nous estimons les cash-flows futurs jusqu'à une certaine date, puis nous calculons une valeur terminale (VT) à la fin de l'horizon explicite. L'approche la plus courante pour

calculer la VT est celle de Gordon-Shapiro qui se base sur un taux de croissance perpétuel (g) :

$$\text{Valeur Terminale} = \frac{F_0 * (1 + g)}{t - g}$$

Le flux F_0 représente simplement le dernier flux de notre horizon. Le taux de croissance perpétuel est déterminé d'après le taux de croissance anticipé du secteur et de l'économie sur le long terme. Typiquement, un taux entre le taux d'inflation historique et le taux de croissance du PIB historique est utilisé. En effet, il est possible d'assumer que l'entreprise en question suivra la croissance de l'économie si l'industrie dans laquelle elle opère est cyclique (par exemple dans les biens de consommation). Pour ce genre de considérations, il semble approprié d'inclure de la durabilité. Si nous voulions évaluer l'évolution des cash-flows au-delà d'un horizon où les prévisions sont faisables, il serait intéressant d'inclure les potentiels dommages liés au climat qui justement représentent un aspect de long terme.

Nous développons donc ci-dessous un exercice d'évaluation d'une entreprise fictive. Nous estimons les cash-flows futurs de l'entreprise de la manière suivante :

Cash-flows libres estimés				Valeur terminale		
millions USD	2020	2021	2022	Variante 1	Variante 2	Variante 3
CFL estimés	6'000	6'500	7'100	7'353	7'346	7'275
Croissance en %		8,3%	9,2%	3,6%	3,46%	2,47%
				PIB réel	PIB durable 1	PIB durable 2

La VT est calculée en utilisant $F_0 = 7'000$ et $g = 3,6\%$ ou $3,46\%$ ou $2,47\%$, qui représentent respectivement le taux de croissance moyen du PIB réel entre 2007 et 2016¹⁷, le taux de croissance du PIB durable avec un facteur d'escompte bas et avec un facteur d'escompte haut. Avec un coût moyen pondéré du capital (CMPC) choisi arbitrairement à 8% , nous trouvons les valeurs des fonds propres et des actions suivantes :

Taux de croissance	3,6%	3,46%	2,47%
Valeur entreprise	182'757	178'563	148'326
Valeur nette de la dette	20'000	20'000	20'000
Valeur fonds propres	162'757	158'563	128'326
Valeur estimée des actions	162,76	158,56	128,33
Nombres d'actions (millions)	1000		

Ainsi, nous voyons que l'action perd entre 3% et 20% de sa valeur selon le PIB durable que nous choisissons. Cela représente un montant important et peut influencer directement le choix des investissements d'une entreprise intéressée dans ces actions. Le choix du facteur d'escompte β peut paraître encore plus subjectif dans ce genre de calculs, mais il pourrait être remplacé par le taux d'intérêt. En effet, le taux d'intérêt représente la patience des investisseurs sur les marchés financiers. Jusqu'à maintenant, nous avons utilisé β , la patience d'un individu, car nous nous intéressons au bien-être de la population et non

des marchés financiers. Utiliser le taux d'intérêt serait académiquement incorrect. Cependant, cela donnerait plus de transparence au calcul. Dans notre cas, nous comparerions alors un taux d'intérêt de $0,1\%$ (β haut) avec un taux de $1,5\%$ (β bas).

Cet exemple fictif montre l'intérêt que peut avoir un ajustement du taux de croissance du PIB pour prendre en compte des aspects durables liés à l'environnement. Il impose néanmoins de bien maîtriser les hypothèses sur les dommages futurs et surtout de bien estimer les paramètres liés à ceux-ci.

¹⁷ Nous faisons ici l'hypothèse que la croissance du PIB ne va pas être fondamentalement différente de cette moyenne dans le futur.

Conclusion

Les problèmes sociaux et environnementaux vont certainement augmenter ces prochaines années. Pour que le système économique continue de fonctionner, il est nécessaire de prendre en compte ces aspects dans les décisions politiques et économiques. Pour ce faire, nous avons besoin de mesures plus fiables, plus centrées sur le bien-être de l'individu et moins biaisées vers une production intensive.

Cette étude développe un PIB durable. Ce PIB enlève à la croissance du PIB standard la valeur future des dommages liés à l'environnement provoqués par les émissions de gaz à effet de serre. De cette manière, la croissance du PIB durable ne « vole » pas des ressources aux générations futures. En d'autres termes, cette mesure inclut l'externalité négative liée au climat.

La méthodologie repose sur un modèle économique. Cette approche novatrice permet de réduire le côté arbitraire des nouvelles mesures du bien-être et d'être ainsi transparent sur l'évaluation des coûts. Elle nécessite néanmoins des hypothèses fortes mais acceptées par la communauté scientifique. Cela permet d'obtenir un calcul simplifié de l'ajustement nécessaire pour tenir compte des émissions.

Les résultats montrent que le PIB mondial doit être ajusté d'une valeur comprise entre 0,1 et 1,1 point(s) de pourcentage selon l'importance que les individus mettent sur les générations futures (selon le facteur d'escompte β). Ceci représentait approximativement 75 et 825 milliards de dollars au niveau mondial en 2016. En utilisant une croissance moyenne du PIB de 3,57 % pour la période allant de 2007 à 2016, la croissance du PIB durable s'élève entre 3,46 et 2,47 % respectivement. Si la situation en termes de

réchauffement climatique devenait catastrophique, alors la croissance passerait même à 2,67 % et -9,45 % selon le facteur d'escompte. Nous comprenons dès lors que la perception de la croissance durable peut être considérablement différente de celle de la croissance du PIB et que l'externalité liée au climat ne peut pas être ignorée.

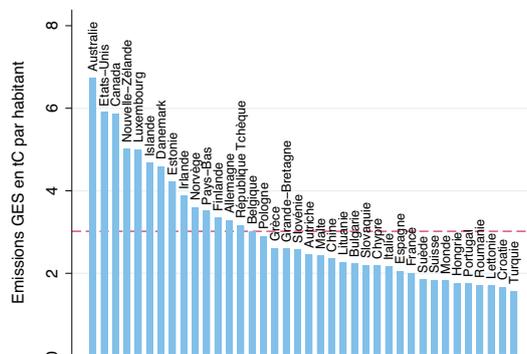
Ces ajustements, s'ils venaient à être acceptés à une plus grande échelle, auront certainement un impact sur les décisions des agents. Les décisions d'investissement seraient impactées, car le PIB durable représente mieux le potentiel de croissance futur de notre économie. Les politiques économiques servant à stimuler la croissance pourraient s'orienter sur la réduction des émissions qui apporterait de la valeur déjà aujourd'hui. D'autres ajustements, suivant la même méthodologie, pourraient être ajoutés afin de mieux prendre en compte les besoins de la population.

L'urgence climatique et les troubles sociaux ne nous permettent plus d'attendre. Il est temps de changer les choses. Cependant, le monde actuel, dans sa complexité, a besoin de mesures pragmatiques et acceptées par la majorité. Cette étude a tenté d'adresser le problème de manière simplifiée et objective. Elle montre une méthode possible d'ajustement de notre système et ouvre le débat sur la remise en cause de la croissance. Le grand défi de ces nouvelles mesures reste néanmoins d'être acceptées et utilisées à grande échelle.

Annexes

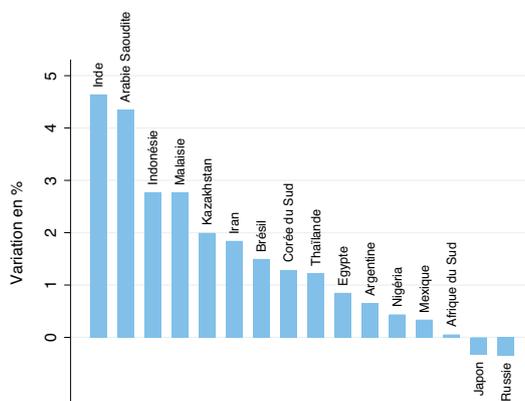
Annexe A : Figures additionnelles

Figure A.1 : Emissions de GES en tC par habitant



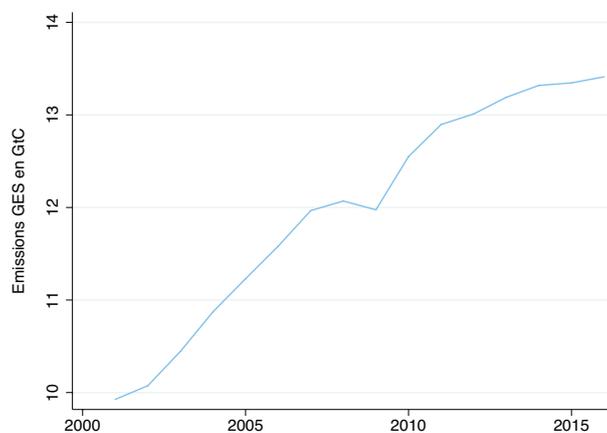
Source : l'Agence Néerlandaise de l'Environnement pour les émissions mondiales, de la Chine et des Etats-Unis, l'OCDE pour les émissions des autres pays et la Banque Mondiale pour la population totale. La ligne rouge représente la moyenne de l'échantillon. La barre « Monde » présente les émissions par habitant du monde comme s'il représentait un pays. Ce n'est pas tout à fait la même chose que la moyenne mondiale d'émissions par habitant. Pour celle-ci, il faudrait disposer des émissions de chaque pays du monde.

Figure A.2 : Variation annuelle moyenne des émissions entre 2008 et 2016



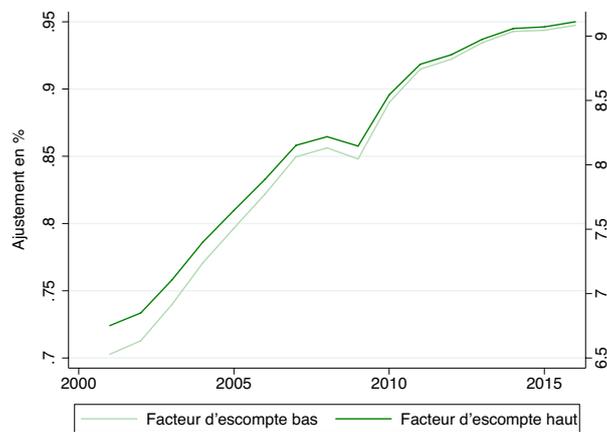
Source : l'Agence Néerlandaise de l'Environnement. Cette figure présente la variation annuelle moyenne des émissions pour les pays les plus pollués. Nous remarquons qu'il s'agit principalement des pays en voie de développement.

Figure A.3: Evolution des émissions mondiales de GES en GtC



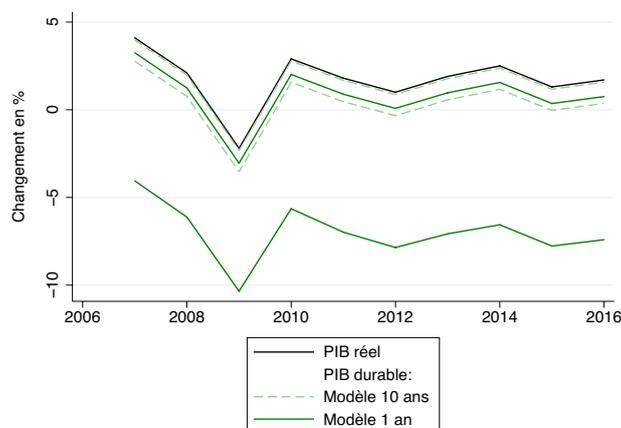
Source : l'Agence Néerlandaise de l'Environnement.

Figure A.4: Evolution de l'ajustement lié à l'externalité



L'axe de gauche correspond au facteur d'escompte, β , bas, tandis que l'axe de droite correspond au facteur d'escompte, β , haut.

Figure A.5: Croissance du PIB réel et du PIB durable en % pour la Suisse



Les deux courbes vertes du haut correspondent à un facteur d'escompte, β , bas, tandis que les deux du bas correspondent à un facteur d'escompte, β , élevé.

Annexe B: Tableau additionnel

Tableau B.1: Part des émissions d'un pays par rapport aux émissions totales en 2016

Pays	Part émissions en %	Pays	Part émissions en %
Chine	26,11	Irlande	0,14
Etats-Unis	13,27	Hongrie	0,13
Allemagne	1,96	Norvège	0,13
Canada	1,52	Portugal	0,13
Australie	1,12	Bulgarie	0,12
Grande-Bretagne	1,06	Finlande	0,12
Turquie	1,00	Suède	0,12
France	0,92	Suisse	0,11
Italie	0,87	Slovaquie	0,08
Pologne	0,82	Lituanie	0,06
Espagne	0,67	Croatie	0,05
Pays-Bas	0,44	Estonie	0,04
Roumanie	0,24	Slovénie	0,04
Belgique	0,23	Lettonie	0,03
République Tchèque	0,23	Chypre	0,02
Danemark	0,18	Luxembourg	0,02
Grèce	0,17	Islande	0,01
Nouvelle-Zélande	0,16	Malte	0,01
Autriche	0,14		

Source : l'Agence Néerlandaise de l'Environnement pour les émissions totales, de la Chine et des Etats-Unis et l'OCDE pour les émissions des autres pays.

Annexe C : Développement de l'externalité du climat

Nous cherchons à calculer :

$$\frac{\partial V_t(S_{t-1})}{\partial t} = \frac{1}{Y_t} \frac{\partial Y_t}{\partial t} + \beta \mathbb{E}_t \frac{\partial V_{t+1}(S_t)}{\partial S_t} \frac{\partial S_t}{\partial t}$$

Nous savons que le stock de carbone peut être séparé en deux stocks plus facilement utilisables. La partie liée à l'externalité devient :

$$\frac{\partial V_{t+1}(S_t)}{S_t} \frac{\partial S_t}{\partial t} = \frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{1,t}} \frac{\partial S_{1,t}}{\partial t} + \frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{2,t}} \frac{\partial S_{2,t}}{\partial t}$$

Nous devons désormais calculer les deux dérivées. Pour ce faire rappelons-nous comment s'écrit l'utilité indirecte en utilisant le fait que $C_t = Y_t$, la forme fonctionnelle pour Y_t et la division en deux stocks pour S_t :

$$\begin{aligned} V_t(S_{t-1}) &\equiv \max_{E_t} [\log(C_t) + \beta \mathbb{E}_t V_{t+1}(S_t)] \\ &\equiv \max_{E_t} \log[\exp\{-\gamma_t(S_{1,t-1} + \varphi_L E_t + (1 - \varphi)S_{2,t-1} + (1 - \varphi_L)\varphi_0 E_t - \bar{S})E_t\}] \\ &\quad + \beta \mathbb{E}_t V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t}) \end{aligned}$$

Afin de pouvoir calculer les deux dérivées, nous pouvons d'abord écrire la dérivée avec un retard d'une période et utiliser le Théorème de l'Enveloppe :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_t(S_{1,t-1}, S_{2,t-1})}{\partial S_{1,t-1}} &= -\gamma_t + \beta \mathbb{E}_t \frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{1,t}} \overbrace{\frac{\partial S_{1,t}}{\partial S_{1,t-1}}}^{= 1} = -\gamma_t - \beta \mathbb{E}_t \gamma_{t+1} - \beta^2 \mathbb{E}_t \gamma_{t+1} - \dots \\ &= -\sum_{s=0}^{\infty} \beta^s \mathbb{E}_t \gamma_{t+s} \\ \frac{\partial V_t(S_{1,t-1}, S_{2,t-1})}{\partial S_{2,t-1}} &= -\gamma_t(1 - \varphi) + \beta \mathbb{E}_t \frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{2,t}} \overbrace{\frac{\partial S_{2,t}}{\partial S_{2,t-1}}}^{= (1 - \varphi)} \\ &= -\gamma_t(1 - \varphi) - \beta \mathbb{E}_t \gamma_{t+1}(1 - \varphi)^2 - \beta^2 \mathbb{E}_t \gamma_{t+1}(1 - \varphi)^3 - \dots \\ &= -\sum_{s=0}^{\infty} \beta^s \mathbb{E}_t \gamma_{t+s}(1 - \varphi)^{s+1} \end{aligned}$$

Avancé d'une période, cela donne :

$$\frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{1,t}} = - \sum_{s=0}^{\infty} \beta^s \mathbb{E}_t \gamma_{t+s+1}$$

$$\frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{2,t}} = - \sum_{s=0}^{\infty} \beta^s \mathbb{E}_t \gamma_{t+s+1} (1 - \varphi)^{s+1}$$

L'évolution des stocks de carbone se fait de la manière suivante :

$$\frac{\partial S_{1,t}}{\partial t} \approx S_{1,t} - S_{1,t-1} = \varphi_L E_t$$

$$\frac{\partial S_{2,t}}{\partial t} \approx S_{2,t} - S_{2,t-1} = (1 - \varphi_L) \varphi_0 E_t - \varphi S_{2,t-1}$$

Utilisant ces deux équations ainsi que les deux dérivées, nous trouvons :

$$\beta \mathbb{E}_t \frac{\partial V_{t+1}(S_t)}{\partial S_t} \frac{\partial S_t}{\partial t} = \beta \mathbb{E}_t \frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{1,t}} \frac{\partial S_{1,t}}{\partial t} + \beta \mathbb{E}_t \frac{\partial V_{t+1}(S_{1,t}, S_{2,t})}{\partial S_{2,t}} \frac{\partial S_{2,t}}{\partial t}$$

$$= - \sum_{s=0}^{\infty} \beta^{s+1} \mathbb{E}_t \gamma_{t+s} \varphi_L E_t - \sum_{s=0}^{\infty} \beta^{s+1} \mathbb{E}_t \gamma_{t+s} (1 - \varphi)^{s+1} ((1 - \varphi_L) \varphi_0 E_t - \varphi S_{2,t-1})$$

Nous pouvons simplifier l'équation en supposant que les anticipations des dommages restent constantes dans le temps, i.e. $\mathbb{E}_t \gamma_{t+s} = \bar{\gamma}$ pour tout s :

$$-\bar{\gamma} E_t \sum_{s=0}^{\infty} \beta^{s+1} (\varphi_L + (1 - \varphi_L) \varphi_0 (1 - \varphi)^{s+1}) - \bar{\gamma} \varphi S_{2,t-1} \sum_{s=0}^{\infty} \beta^{s+1} (1 - \varphi)^{s+1}$$

Pour finalement trouver l'équation présentée dans l'étude, il suffit d'utiliser la convergence des sommes géométriques.

Remerciements

Je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide durant la réalisation de cette étude. En particulier, je remercie Professeure Kenza Benhima pour son soutien continu et ses idées pour le développement du PIB durable. J'aimerais également remercier tous les membres du groupe de travail du Think Tank 2020 organisé par Cronos Finance pour leur précieux soutien : Mmes Séverine Arnold,

Corinne Bettens, Rim El Bernoussi et Birgit Moreillon, ainsi que MM. Michael Bolt, Yves Cuendet, Dominique Favre, Nils Gindrat, Jacques-André Monnier, Maxime Moix, Eric Niederhauser, Pascal Renfer, Gérard Séchaud et Joël Wagner.

Sources

24 heures. (29.01.2020). Sonia Seneviratne : la chercheuse engagée excelle dans l'art du climat.

<https://www.24heures.ch/portraits/chercheuse-engagee-excelle-art-climat/story/11668490>

Center for Climate and Energy Solution. Global Emissions.

<https://www.c2es.org/content/international-emissions/>

Confédération Suisse. (2018). L'accord de Paris sur le climat.

https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/climat-affaires-internationales/l_accord-de-paris-sur-le-climat.html, dernier accès le 25/03/2020.

Gerlagh R., Dellink, R., Hofkes, M., and Verbruggen, H. (2002). A measure of sustainable national income for the Netherlands. *Ecological Economics*, 41 : 157-174.

Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., and Tsyvinski, A. (2014). Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1) : 41-88.

Nordhaus, W.D. (2008). *A Question of Balance : Weighting the options on global warming policies*. New Haven, CT : Yale University Press.

Redefining Progress. (1995). *Gross Production vs Genuine Progress*, excerpt from the Genuine Progress Indicator : Summary of data and methodology. San Francisco, 05.

Roulet T. and Bothello J. (2020). *Harvard Business Review : Why "De-growth" Shouldn't Scare Businesses*.

<https://hbr.org/2020/02/why-de-growth-shouldnt-scare-businesses>, dernier accès le 02/03/2020.

Stern N. (2007). *The Economics of Climate Change : The Stern Review*. Cambridge University Press.

Stiglitz, J.E., Fitoussi, J.-P., and Durand M. (2018). *BeyondGDP : Measuring What Counts for Economic and Social Performance*. OECD.

Stiglitz, J.E., Sen A., and Fitoussi, J.-P. (2009). *The measurement of Economic Performance and Social Progress Revisited*. OFCE - Centre de recherche en économie de Sciences Po.

Bases de données

(extraites le 04/05/2020)

European Environment Agency. Atmospheric greenhouse gas concentrations.

<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment-1>

International Monetary Fund. Real GDP growth.

https://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_RPCH@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD

The World Bank. World Development Indicators (GDP).

<https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=NY.GDP.MKTP.CD&country=>

OCDE. Air Emission Accounts.

<https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AEA>

Olivier, J., Schure, K., and Peters, J. (2017). *Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions : 2017 report*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, La Haye.

