

Economics School of Louvain - ESL

Economics School of Namur - ESN

Impacts économiques du réchauffement climatique

Répartition inégale des effets dans le monde et
ralentissement de la croissance des pays pauvres

Auteur : Antoine GOSSIAUX

Directeur : Guilhem CASSAN

Lecteur : William PARIENTE

Année académique 2019-2020

Master en sciences économiques – 120 crédits – Finalité : Spécialisée

Avant-propos

Je tiens avant tout à adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie mon promoteur, le professeur Guilhem Cassan, pour m'avoir aidé dans le choix de ce sujet de mémoire, et les précieux conseils dont il m'a fait part quant aux pistes à explorer dans cette thématique.

Ensuite, je remercie mon lecteur, le professeur William Parienté, pour le temps et l'attention qu'il ne manquera pas d'accorder à mon mémoire dans la lecture de celui-ci.

Je remercie également l'Université de Namur, l'Université Catholique de Louvain, et l'Economic School of Louvain pour l'enseignement de qualité qu'ils prodiguent et dont j'ai pu profiter au long de mon cursus.

Enfin, je voudrais particulièrement remercier ma copine pour sa patience, son aide, et son soutien moral qu'elle m'a accordé au cours de l'écriture de ce mémoire.

Table des matières

Introduction	5
1 Impacts dans le secteur agricole	10
1.1 Économies pauvres	11
1.2 Économies développées	14
1.3 Tableau récapitulatif des impacts sur le secteur agricole	18
2 Impacts sur les facteurs de production	19
2.1 Productivité du travail	19
2.1.1 Économies pauvres	21
2.1.2 Économies développées	24
2.2 Productivité globale des facteurs	30
2.2.1 Tableau récapitulatif des impacts sur la productivité du travail et la productivité globale des facteurs	32
2.3 Investissement	33
2.3.1 Tableau récapitulatif des impacts sur l'investissement	35
3 Impacts sur les performances économiques	36
3.1 Production	36
3.1.1 Économies pauvres	37
3.1.2 Économies développées	42
3.1.3 Tableau récapitulatif des impacts sur la production	46
3.2 Revenus	47
3.2.1 Économies pauvres	48
3.2.2 Économies développées	49
3.2.3 Tableau récapitulatif des impacts sur le revenu par habitant	51
3.3 Croissance	52
3.3.1 Pays pauvres	53

3.3.2	Économies développées	54
3.3.3	Tableau récapitulatif des impacts sur la croissance économique annuelle	56
4	Prévisions du modèle théorique	57
4.1	La fonction de production	57
4.2	Réchauffement envisagé	59
4.3	Résultats	59
4.4	Limites	61
4.5	Effets supplémentaires	62
	Conclusion générale	64
	Bibliographie	66

Introduction

Depuis quelques décennies, et essentiellement au cours de ces 30 à 40 dernières années, la température moyenne mondiale s'accroît à une vitesse jamais observée depuis plusieurs milliers d'années (GIEC, 2014). Selon le Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, ce réchauffement global résulte de l'activité humaine.

En effet, la température augmente de façon exponentielle depuis la révolution industrielle. L'un des facteurs principaux du changement climatique sont les gaz à effets de serre (GES), dont les plus grandes quantités émises concernent le CO₂ (OMM, 2019). La concentration atmosphérique de ces gaz ne fait qu'augmenter depuis l'ère préindustrielle, entraînant de nombreux effets notamment sur l'élévation des températures (GIEC, 2014). Celles-ci ont pour conséquence de provoquer de nombreux impacts sur les écosystèmes, les conditions de vie, et l'économie mondiale, comme le montre une littérature abondante étudiée dans ce travail.

Suite à cette tendance d'émissions massives de GES, la température moyenne de la terre va continuer à croître au cours du siècle, selon un rythme et une importance fortement déterminés par les émissions de GES futures de l'activité humaine au cours des prochaines décennies (GIEC, 2014). Selon le rapport spécial du GIEC (2018), les conclusions sont très claires : les systèmes humains et les écosystèmes naturels subiront des dommages plus importants si le réchauffement atteint des niveaux plus élevés.

En prenant le cas du gaz ayant le plus fort impact, il est important de remarquer que la quantité de CO₂ émise est extrêmement différente selon les pays. Ainsi, sur la période de 1751 à 2014, les USA ont été responsables de 26% des émissions mondiales, tandis que l'Indonésie et l'Afrique du sud, par exemple, étaient chacune responsable de 1% des quantités cumulées (Hsiang & Kopp, 2018). Il y a donc une très grande hétérogénéité dans la répartition du CO₂ libéré dans l'atmosphère entre les nations. Ce décalage met en évidence un problème important d'inégalités extrêmes quant aux émissions de pollution et aux impacts qui en découlent. En effet, le dioxyde de carbone émis dans un endroit du globe n'a pas uniquement des impacts sur la zone d'émission, mais plutôt un impact global car il rejoint et

augmente le stock de CO2 concentré dans l'atmosphère. Les quantités élevées relâchées par les économies développées et fortement industrialisées, et donc fortement émettrices, auront donc également des impacts sur les pays pauvres peu développés, émettant très peu de GES en termes relatifs.

Plus important encore, ce sont en très grande majorité les pays pauvres qui sont les plus vulnérables à la variabilité du climat et au réchauffement des températures (Acevedo & al., 2018). Puisque les pays les moins développés sont principalement situés dans des régions du globe ayant initialement un climat chaud, une augmentation de la température moyenne leur serait encore plus fatale, en comparaison avec les pays développés situés majoritairement à des latitudes offrant un climat plus doux.

Le changement climatique peut avoir des conséquences dramatiques sur les pays vulnérables via les causes évidentes telles que les inondations et sécheresses plus fréquentes, ou l'élévation du niveau des océans qui menace les petits pays insulaires et les populations côtières (Ambrosi & Hallegatte, 2005; Acevedo & al., 2018). Mais aussi, le réchauffement global peut impacter le niveau de vie des pays vulnérables en influant sur sa croissance économique via les effets directs de la température. C'est ce que ce travail essaye de développer.

La littérature existante sur cette problématique révèle que la relation entre température et performance économique est non-linéaire, et qu'une augmentation des températures moyennes annuelles d'un pays provoque des effets néfastes sur les facteurs de production au delà d'un seuil optimal de température estimé à 13°C (Burke & al., 2015). Les chocs de températures, ainsi qu'une moyenne annuelle plus élevée, diminuent la productivité du travail¹, l'investissement total², et la productivité globale des facteurs (Letta & Tol, 2016) dans une économie dont les secteurs d'activités sont exposés aux conditions météorologiques et à leurs variations. Ces secteurs économiques touchés sont évidemment l'agriculture, qui dépend directement du climat pour sa production, mais aussi les secteurs d'activités industrielles, de manufactures, et des services, dans le cas où ceux-ci ne disposent pas de systèmes pour se protéger des chaleurs extérieures (comme la climatisation par exemple)³. Il en résulte une diminution de la production et des revenus de ces secteurs, qui se répercute en une diminution de la production nationale⁴ des pays touchés, ralentissant aussi leur croissance à long terme.⁵

1. Acevedo & al. (2015); Somanathan & al. (2015); Graff Zivin & Neidel. (2010); Niemelä & al. (2002); Seppänen & al. (2003); Seppänen & al. (2006); Deryugina & Hsiang, (2014)

2. Acevedo & al. (2018); Dell & al. (2008)

3. Acevedo & al. (2018); Somanathan & al. (2015); Niemelä & al. (2002)

4. Hsiang (2010); Jones & Olken (2010); Somanathan & al. (2015); Cachon & al. (2012)

5. Acevedo & al. (2018); Dell & al. (2008); Dell & al. (2012)

Tous ces mécanismes qui mènent à un ralentissement de la croissance à cause de l'augmentation des températures affectent principalement les pays pauvres et en développement, qui sont les plus vulnérables au réchauffement en raison de leurs niveaux de températures initialement supérieurs au seuil optimal trouvé par Burke & al. (2015).

Les pays développés ne subissent pas les mêmes impacts suite au réchauffement de leurs régions. Ceux-ci se trouvant principalement dans des zones aux températures moyennes annuelles inférieures ou très proches à 13°C, ils ne pâtissent pas d'impacts sur leur performance économique globale. Au contraire, pour les pays développés situés aux latitudes extrêmes, l'élévation des températures fait s'approcher leur moyenne annuelle du seuil optimal de température pour l'activité économique et peut engendrer un accroissement de leur production et une accélération de leur croissance (Acevedo & al., 2018; Diffenbaugh & Burke, 2019). Cependant, même si les économies développées ne montrent pas de réponses négatives de leur performance économique globale à des chocs de températures et l'augmentation de la moyenne annuelle, elles subissent tout de même une baisse de productivité dans les secteurs exposés à des fortes chaleurs. Mais les secteurs où les travailleurs ont des pertes de productivité sont des activités n'occupant que peu de poids dans le PIB national, tandis que les secteurs ayant un lourd impact sur le PIB (notamment le secteur tertiaire) dispose très majoritairement des moyens de se prémunir des conditions climatiques⁶. La production nationale d'une économie développée et sa croissance n'est donc pas impactée de manière négative par le réchauffement.

Ce travail est organisé de la façon suivante : Dans le premier chapitre, je présenterai les impacts de l'augmentation des températures dans le secteur de l'agriculture selon les différents mécanismes à l'oeuvre. Ces impacts sont répartis suivant leur survenance dans les économies pauvres en premier lieu, puis dans les économies développées.

Dans le second chapitre, je présenterai les impacts sur les facteurs de production économique. Le premier facteur présenté est la productivité du travail qui fera l'objet de la première section de ce chapitre. Les effets qu'il subit seront répartis à nouveau suivant les économies pauvres et les économies développées. La deuxième section présentera l'effet sur la productivité globale des facteurs, selon l'étude de Letta & Tol (2016). La troisième section analysera l'impact sur l'investissement total d'une économie.

Dans les troisième chapitre, j'aborderai les conséquences d'un accroissement des tem-

6. Niemelä & al. (2002); Seppänen & al. (2003); Seppänen & al. (2006); Deryugina & al. (2014)

pératures sur les performances économiques totales d'un pays. La première section de ce chapitre rassemblera les effets qui pèsent sur la production totale des secteurs d'une économie. La deuxième section présentera la fluctuation des revenus qui en découle. La troisième section rassemblera les estimations de l'impact sur la croissance économique des pays. Les effets rapportés dans ces trois sections sont à chaque fois présentés dans un premier temps pour les économies pauvres, et pour les économies développées dans un second temps.

Dans le dernier chapitre, je présenterai le modèle théorique que j'utilise dans ce travail afin d'estimer l'impact sur la croissance économique annuelle des pays pauvres à la fin du siècle.

Chapitre 1

Impacts dans le secteur agricole

A première vue, il serait instinctif de déclarer que le secteur agricole est le secteur le plus impacté par le changement climatique. Puisqu’il utilise directement la température et les précipitations comme inputs de sa production, il est forcément très dépendant des conditions climatiques. Les niveaux de précipitations et les chocs de températures ont donc un effet significatif sur la production agricole, à court terme comme à moyen terme (Acevedo & al., 2018). En effet, selon cette étude, la productivité agricole est améliorée à court terme lorsque les précipitations augmentent durant la période de croissance des cultures. Cependant, ce n’est pas cette relation qui sera étudiée dans ce travail, car son effet sur la production agricole est bien moindre comparé au second input de l’activité agricole. L’effet central qui sera étudié ici est celui des températures sur l’agriculture. Il a été montré que les températures, comparé aux précipitations, ont un effet à plus long terme sur la production agricole. Celle-ci diminue et voit sa valeur ajoutée diminuer également lorsque les températures augmentent. Ceci est la conclusion générale des articles qui suivent.

De manière globale, il est observé que lorsque les températures dépassent un seuil optimal variable selon le type de plante cultivé, la production agricole diminuera de manière significative avec le réchauffement. Ceci est la conclusion de plusieurs études qui se sont consacrées à montrer que la relation entre les niveaux de température et l’activité agricole est négative et non-linéaire, telles que Dell, Jones, & Olken (2014), Acevedo & al. (2018), Burke & al. (2015), Schlenker & Roberts (2009).

Les premières intuitions dans le domaine prévoyaient pourtant des effets opposés entre les pays pauvres et les pays développés, avec certaines études montrant même des effets positifs sur la production agricole des pays développés grâce au réchauffement du climat dans ces régions (Deschênes & Greenstone, 2007). Contrairement à ces résultats, la relation observée est bien négative et non-linéaire autant dans les pays pauvres que dans les pays développés

(Dell, Jones, Olken, 2014).

Dans cette partie, je vais présenter les méthodes et les résultats des études antérieures sur ce sujet, en distinguant l'analyse des impacts sur les pays développés de celle des pays pauvres. Ceci dans le but de démontrer les effets inégaux à travers le monde, mais impactant négativement les performances de production dans chaque climat.

1.1 Économies pauvres

Les pays pauvres ont une part importante de leur économie qui dépend de l'agriculture. En moyenne en Afrique subsaharienne, environ 15% du PIB venait du secteur agricole en 2019, avec des valeurs extrêmes grimpant jusqu'à 62% du PIB pour la Somalie. En comparaison, le secteur agricole en Europe représentait seulement 1,6% du PIB de l'UE, tandis qu'il comptait pour 0,9% du PIB des USA (en 2017).¹ La sécurité économique et alimentaire de ces pays passe donc fortement par les bonnes performances de leur secteur agricole.

Cependant, les études de panel pour les pays pauvres et en développement montrent un impact négatif statistiquement significatif des chocs de températures sur la production agricole. En Afrique subsaharienne par exemple, Schlenker et Lobell (2010) découvrent qu'une augmentation des températures est liée à une réduction du rendement agricole. Guiteras (2009) prouve que les hautes températures réduisent la production agricole en Inde. Feng, Krueger, & Oppenheimer (2010) découvraient que la même relation est observée au Mexique. Même si ces deux nations ont un PIB élevé en valeur absolue, leur population n'en demeure pas moins en grande partie pauvre et dépendante de l'agriculture (Presque 49% de l'emploi en Inde se trouve dans le secteur agricole, et 13,7% au Mexique)².

Le problème qui se pose est lié, d'une part, à l'emplacement géographique des pays pauvres. Ceux-ci sont majoritairement situés dans des zones au climat chaud, atteignant donc des chaleurs extrêmes à la suite d'un choc de température, et renforçant donc les effets néfastes. D'autre part, il est lié à la très grande proportion de la population des pays pauvres qui dépendent de l'agriculture comme moyen de subsistance. Selon l'Organisation

1. Données de la Banque Mondiale, 2019.

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.AGR.TOTL.ZS?locations=ZG>

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.AGR.TOTL.ZS?locations=EU>

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.AGR.TOTL.ZS?locations=US>

2. Données de la Banque Mondiale, 2011

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SL.AGR.EMPL.ZS?end=2011&locations=IN&start=1983&view=chart>

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SL.AGR.EMPL.ZS?end=2011&locations=MX&start=1983&view=chart>

Météorologique Mondiale (OMM, 2018), c'est plus de 70 à 80% de la population rurale en Afrique qui dépend d'une agriculture très vulnérable aux extrêmes du climat. Les effets du changement climatique affectent fortement les activités agricoles de ces pays initialement chauds et victimes des chocs du climat, augmentant ainsi les risques de famines. En réalité, les conséquences se font déjà sentir actuellement suite au réchauffement déjà survenu à ce jour. Celui-ci vient contrecarrer les avancées réalisées dans la lutte contre la faim, qui était en diminution depuis quelques années (OMM, 2018). Selon la déclaration de l'OMM, la faim dans le monde en 2017 connaissait une augmentation continue et touchait 821 millions de personnes. En Afrique, les pays vulnérables montrent une proportion de leurs habitants en sous-alimentation plus de 2x plus importante que des pays aux niveaux de revenus similaires et moins exposés aux chocs climatiques (OMM, 2018). En 2018, ce sont 31 pays qui ont nécessité une aide alimentaire extérieure.

Schlenker & Lobell (2010) ont évalué l'impact du réchauffement climatique sur le secteur agricole en Afrique jusqu'à la moitié du XXI^e siècle. Ils ont combiné les données de rendements national de 5 cultures de plantes de base (maïs, sorgho, millet, arachides, manioc) entre 1961 et 2006, avec les relevés de températures journalières entre 1961 et 2002. Pour les prédictions de températures jusqu'à la moitié du siècle, ils basent leur modèle sur le scénario A1B d'évolution du climat. Ce scénario du GIEC prévoit une croissance économique très rapide au cours du XXI^e siècle et homogène autour du globe. Il prévoit un réchauffement de 1,7 à 4,4°C d'ici 2100, avec une estimation moyenne à 2,95°C (GIEC, 2013).

Leurs résultats montrent une diminution du rendement de chaque culture avec l'élévation des températures pour l'agriculture en Afrique lors de la période 2046-2065 (représentative de la situation à la moitié du siècle). Plus précisément, ils s'attendent à une diminution moyenne du rendement de 22% pour le maïs, 18% pour les arachides, 17% pour le sorgho et le millet, et 8% pour le manioc (statistiquement significatifs au seuil de 5%) (Schlenker & Lobell, 2010). Ces résultats sont grandement préoccupants car il s'agit des principales plantes cultivées dans ces régions. L'impact sur la sécurité alimentaire sera donc important, tout comme le choc négatif que subira l'économie de ces pays, dont une grande part repose sur les performances agricoles.

Des résultats allant dans le même sens sont fournis par Acevedo & al. (2018) dans une étude du Fond Monétaire International (FMI). Ils étudient les fluctuations de températures et de précipitations dans 189 pays entre 1950 et 2015 dans le but d'observer les effets sur l'évolution de plusieurs variables économiques. Dans ce travail, seuls les résultats qui découlent des variations de température seront repris.

Ils montrent que la valeur ajoutée produite par l’agriculture, ainsi que son niveau de production³, diminuent lors de hautes températures. Plus précisément, un pays ayant une température moyenne annuelle de 22°C verra la valeur ajoutée de sa production agricole diminuer de 1,6% suite à un réchauffement de 1°C. Dans le cas d’un pays plus chaud avec une moyenne annuelle de 25°C, cette diminution s’élèvera à 1,9% (Acevedo & al, 2018). En étudiant l’effet sur le niveau de production agricole de pays caractérisés par les mêmes températures moyennes, un réchauffement d’un degré à partir de 22°C de moyenne provoque une baisse de 2,8%. A partir d’une moyenne de 25°C, la baisse est de 3,7% (Acevedo & al, 2018). Ces impacts sont tous statistiquement significatifs au seuil de 1% et ont lieu de manière contemporaine avec le choc météorologique. Durant les années suivantes, le secteur continue de subir des pertes, bien que plus petites que lors de l’année du choc, mais les performances de l’agriculture continuent d’être plus faibles à moyen terme (7 années après le choc). Ces moyennes annuelles sont observées dans les pays définis comme pauvres et en développement, respectivement, tandis que la moyenne annuelle des pays développés est de 11°C dans cette étude. Celle-ci montre que la magnitude des impacts du réchauffement climatique dépend du climat initial d’une région ou d’un pays, entraînant alors des conséquences très inégalitaires à travers les différents lieux de la planète.

Afin de montrer les effets négatifs sur le secteur agricole des pays pauvres, faisant consensus à travers les différentes études, voici une analyse portant sur les chocs de température et la réponse de la croissance économique totale pour différents pays. Dell, Jones & Olken (2012) se basent sur les relevés historiques de fluctuations des températures et précipitations à l’intérieur de 125 pays entre 1950 et 2003. Ils tentent d’identifier leurs effets sur les performances économiques globales. Pour ce faire, ils analysent les relations historiques entre les variations de températures et de précipitations, et les changements de performances économiques au sein d’un pays. Ils découvrent alors que l’augmentation des températures a des effets négatifs sur la valeur ajoutée de l’agriculture dans les pays pauvres, conformément aux études renseignées ci-dessus. En effet, pour une augmentation de 1°C de la température moyenne dans un pays pauvre, celui-ci verra la croissance de sa production agricole diminuer de 2,66 points de pourcentage (statistiquement significatif à 1%) (Dell, Jones, & Olken, 2012).

Ils constatent aussi que les effets sur la production agricole sont causés, non seulement par des effets directement sur le niveau de production de l’année du choc de température, mais aussi par des effets impactant le taux de croissance et donc les performances du secteur

3. Le niveau de production des cultures est ici défini comme la quantité de produits agricoles produite et pondérée par leur prix, sans tenir compte de la production pour les graines et fourrages.

dans les années suivantes. Ce résultat rejoint celui de Acevedo & al. (2018). Cet effet sur la croissance du secteur à moyen terme sera développé plus tard dans ce travail.

Au vu des résultats des études sur l'impact agricole du réchauffement, il est forcé de constater que l'élévation des températures à venir va avoir de lourdes conséquences pour les populations des pays fortement exposés aux chocs météorologiques et variations extrêmes des températures. Comme expliqué précédemment, la majorité de ces pays vulnérables au climat sont identifiés comme des économies pauvres, ayant une large part de leur population dépendante de l'agriculture pour survivre, et disposant de peu de moyens pour se prémunir contre les effets néfastes du réchauffement global.

1.2 Économies développées

De manière identique aux conclusions des travaux ci-dessus, les résultats dans les pays développés montrent la même relation négative. Dans la partie qui suit, je vais donc présenter les études estimant l'impact sur le secteur agricole du pays le plus représentatif des économies développées, c'est à dire les États-Unis.

Le maïs étant la principale céréale fourragère cultivée aux USA (plus de 95% de la production de ce type de céréales est du maïs⁴), Schlenker & Roberts (2006) estiment l'effet non-linéaire des conditions météorologiques sur les rendements de ces cultures dans l'est des États-Unis. Ils utilisent des données de rendements du maïs dans 1839 comtés Américains entre 1950 et 2004, et les croisent avec les relevés de températures quotidiennes dans ces comtés. Ils concluent que ces cultures ont effectivement une relation non-linéaire avec les niveaux de températures. Ainsi, le rendement croît avec les températures entre 12 et 25°C, puis connaît une zone de rendement optimal entre 25 et 30°C, avant de chuter lorsque les températures dépassent 30°C. L'effet est conséquent, puisqu'ils calculent que 24 heures d'exposition à 38°C provoque une baisse du rendement annuel de 5% en comparaison avec 24 heures à 8°C (Schlenker & Roberts, 2006).

Afin d'apporter des estimations sur les autres principaux types de cultures aux États-Unis, voici une étude rapportant les effets de la variation des températures sur les rendements du maïs, ainsi que du soja et du coton. Schlenker & Roberts (2009) analysent la croissance des rendements de ces 3 cultures agricoles aux États-Unis, entre 1950 et 2005. Selon eux

4. United State Department of Agriculture, 2020.

et conformément aux résultats des autres auteurs précédemment cités, la relation entre la croissance des plantes et les températures est non-linéaire. Une moyenne temporelle ou spatiale des effets aurait pour conséquence de lisser le véritable effet des températures, il doit donc être analysé en tenant compte du seuil optimal de température.

Afin d'avoir des estimations de l'évolution du climat jusqu'à la fin du siècle, ils utilisent le modèle de "Hadley 3"⁵ couplé à 2 scénarios différents : Premièrement, le scénario B1 qui est le plus optimiste et correspond au réchauffement le plus lent, entre 1,1 et 2,9°C d'ici 2100, avec une estimation moyenne de +1,98°C (GIEC, 2013). Deuxièmement, le scénario A1F1 qui est le plus désastreux, avec le réchauffement le plus rapide, entre 2,4 et 6,4°C d'ici la fin du siècle, avec une estimation moyenne de +4,49°C (GIEC, 2013).⁶

Ils ont étudié les impacts du réchauffement estimé par ces scénarios sur les cultures des 3 plantes principales citées ci-dessus. Les futurs rendements estimés ont alors été calculés comme une fonction des variables climatiques et de contrôles.

Leurs résultats montrent que les rendements connaissent une croissance graduelle avec la température jusqu'à 29-32°C (29°C pour le maïs, 30°C pour le soja, et 32°C pour le coton). Au delà de ce seuil critique de température, les rendements chutent pour chaque type de culture. En prenant l'exemple du maïs, une diminution de 7% du rendement est attendue lorsqu'on remplace une exposition de 24h à sa température optimale de 29°C par 24h d'exposition à 40°C. Ce résultat présente une information complémentaire à celui trouvé par Schlenker & Roberts (2006). La diminution entre 29 et 40°C est plus importante que celle entre 8 et 38°C car, à une température de 8°C, le rendement est inférieur à celui du seuil de température optimale. Au delà de ce seuil, la chute est brusque et importante pour chaque degré supplémentaire, montrant alors une plus forte diminution au niveau de 40°C par rapport à celui de 38°C.

Les deux autres cultures présentent des réponses plus modérées au niveau de 40°C, avec une baisse de 5% et de 4% pour le soja et le coton respectivement. De manière plus approfondie, ils montrent que les rendements vont diminuer de 30 à 46% selon le type de culture d'ici 2100 en considérant le scénario B1. Plus préoccupant encore, ces pertes pourraient réduire de 63 à 82% la quantité produite dans le cas d'un réchauffement rapide correspondant au scénario A1F1. Étant donné que les États-Unis sont un des plus gros producteurs et exportateurs mondiaux de marchandises agricoles, les effets du réchauffement sur sa production pourraient entraîner des répercussions sur les prix et l'offre de biens alimentaires à travers

5. Le modèle HadCM3 est un modèle climatique créé en 1999 et utilisé dans les 3ème, 4ème et 5ème rapports du GIEC

6. Le scénario A1F1 se base sur l'hypothèse de continuité de l'utilisation intensive des énergies fossiles, associée donc à l'augmentation la plus importante de la concentration de CO2 et au réchauffement le plus élevé (GIEC, 2007).

le monde (Schlenker & Roberts, 2009). Cet effet de marché ne sera pas étudié d'avantage dans ce travail, qui se concentre sur les conséquences directes de l'élévation des températures.

Tout en utilisant le modèle Hadley 3 mais cette fois avec le scénario A1B, Burke & Emerick (2016) estiment eux aussi l'impact du réchauffement climatique sur la production agricole américaine de maïs jusqu'en 2050. Le scénario A1B présente une augmentation mitigée de la température, supérieure au scénario le plus optimiste B1, et inférieure au plus désastreux A1F1. Selon ce scénario, le réchauffement en 2050 sera de 1,59°C supplémentaire par rapport à 1990 (GIEC, 2013). Les estimations des auteurs montrent une diminution moyenne de la productivité du maïs de 15% comparé à une situation sans réchauffement climatique. Pour donner une idée représentative de l'impact de la variation de production de maïs sur l'économie américaine, les auteurs calculent qu'il en ressort une perte annuelle de \$6,7 milliards d'ici 2050, uniquement en raison du réchauffement climatique sur ce type de culture.⁷

Mais les pertes de profits liées à cette baisse de production agricole ne sont pas faciles à estimer. En effet, le degré d'incertitude est très grand car l'amplitude de la perte dépend grandement de l'évolution attendue du climat. D'ailleurs, Deschênes & Greenstone (2007) annonçaient un bénéfice de l'agriculture américaine en raison de la hausse des températures, à hauteur de \$1,3milliards par an. Ce résultat était une erreur et a été corrigé dans une étude postérieure portant sur les effets des températures dans le secteur agricole américain. Deschênes & Greenstone (2012) ont utilisé les relevés annuels passés et les prévisions futures de températures et de précipitations aux États-Unis afin d'estimer si les profits de l'agriculture sont plus importants ou non lors d'années plus chaudes et plus humides. Pour leurs estimations futures jusqu'en décembre 2009, ils utilisent les données de prédictions journalières du climat de 2 modèles différents : Premièrement, le modèle "Hadley 2"⁸ suivant le scénario IS92a⁹. Deuxièmement, le modèle CCSM 3¹⁰ suivant le scénario A2¹¹.

Ils comparent les estimations de températures futures de ces 2 modèles avec les données de rendements des principales cultures américaines dont l'échantillon représente 84% des

7. Perte estimée sur base des quantités et prix moyens de la période 2006-2010.

8. Le modèle HadGEM2 est le modèle précédent le HadCM3, et utilisé dans le 5ème rapport du GIEC.

9. Ce scénario fut publié par le GIEC en 1992 et prévoit une augmentation de la concentration des gaz à effets de serre en 2100 jusqu'à 2,5x le niveau actuel, et une population atteignant 11,3 milliards de personnes à la fin du siècle. Le réchauffement associé est estimé à une augmentation de 2,38°C par rapport au niveau de 1990 (GIEC, 2013).

10. Le modèle CCSM3 est un modèle de simulation du climat global publié en 2004 par le "Community Earth System Model".

11. Le scénario A2 est presque aussi pessimiste que le scénario A1F1. Il prévoit un réchauffement entre 2,0 et 5,4°C en 2100 par rapport au niveau de 1990, avec une estimation moyenne de 3,79°C (GIEC, 2013).

fermes américaines. Ils estiment alors, en prenant les prévisions du climat à long terme selon le modèle Hadley 2, que les profits de l'agriculture aux USA diminueront en moyenne de \$4,5 milliards par an (en \$ de 2002) jusqu'en 2100 à cause du réchauffement climatique, soit une diminution annuelle de 14%. En se basant sur le modèle CCSM 3 avec le scénario pessimiste A2, ils estiment une perte moyenne de \$9,9 milliards par an d'ici 2100, soit une diminution de près de 30% par rapport aux profits annuels actuels (Deschênes et Greenstone, 2012).

Au total, le secteur agricole américain pourrait perdre entre \$66 (Hadley2) et \$ 164 (CCSM 3) milliards d'ici la fin du XXI^e siècle en raison des pertes de rendements associées au réchauffement climatique. En comparaison, les profits annuels de l'agriculture observés empiriquement sont de \$33 milliards en moyenne (Deschênes et Greenstone, 2012).

Cependant, il est essentiel de remarquer que l'agriculture est loin d'être l'unique secteur à être impacté par les conditions météorologiques et à subir les effets du réchauffement climatique. En raison de l'élévation des températures, les rendements et la production agricole, ainsi que les profits qui en résultent, en pâtissent comme expliqué ci-dessus, mais ce ne sont pas les seuls éléments déterminants les performances économiques à supporter les effets du réchauffement.

Hsiang (2010) a étudié un panel de 28 pays des caraïbes et d'Amérique centrale entre 1970 et 2006 afin de déceler l'effet de l'augmentation des températures sur la production économique des secteurs agricoles et non-agricoles. Il remarque que les fluctuations économiques au niveau national de ces pays ne peuvent pas être uniquement provoquées par les variations de production de l'agriculture. Par son étude, il confirme que la majeure partie des pertes économiques liées aux températures se trouvent dans les secteurs non-agricoles. La valeur totale des pertes de ces secteurs est même 29 fois supérieure à celle des pertes agricoles (Hsiang, 2010). Je reviendrai sur les résultats de son étude dans une prochaine section.

Il est donc extrêmement important, pour étudier l'impact du réchauffement sur l'activité économique, de tenir compte des secteurs d'activités qui ne sont pas directement lié aux conditions climatiques et à la chaleur extérieure.

1.3 Tableau récapitulatif des impacts sur le secteur agricole

<i>Impact des températures sur le secteur agricole</i>				
Étude	Catégorie de pays	Élément impacté	Impact observé	Variation de température
Schlenker & Lobell (2010)	Pays pauvre	Rendement	Maïs : -22% Arachides : -18% Sorgho : -17% Millet : -17% Manioc : -8% <i>Diminutions à la moitié du siècle</i>	+2,95°C en 2100 par rapport à 1990
Acevedo & al. (2018)	Pays pauvre	Valeur ajoutée	-1,6% -1,9%	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
		Volume de production	-2,8% -3,7%	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
Dell & al. (2012)	Pays pauvre	Croissance de la production	-2,66 points de %	+1°C de température moyenne
Schlenker & Robert (2006)	Pays développé	Rendement	-5%/an	24h à 8°C → 24h à 38°C
Schlenker & Robert (2009)	Pays développé	Rendement	-30 à 46% -63 à 82%	+1,98°C en 2100 par rapport à 1990 +4,49°C en 2100 par rapport à 1990
Burke & Emerick (2016)	Pays développé	Rendement	Maïs : -15% <i>Diminution à la moitié du siècle</i>	+2,95°C en 2100 par rapport à 1990 (+1,59°C en 2050)
		Profit	- \$6,7 milliards/an	
Deschênes & Greenstone (2012)	Pays développé	Profit	- \$4,5 milliards/an (-14%/an)	+2,38°C en 2100 par rapport à 1990
			- \$9,9 milliards/an (-30%/an)	+3,79°C en 2100 par rapport à 1990

Chapitre 2

Impacts sur les facteurs de production

2.1 Productivité du travail

La transmission des effets des hausses de températures jusqu’au niveau de l’économie nationale d’un pays se fait à travers plusieurs mécanismes économiques. Dans le chapitre précédent, les impacts sur le rendement, la production totale, et les profits, ont été expliqués pour le secteur de l’agriculture. Dans la première section de ce chapitre, je vais rassembler les résultats des études portant sur l’élément le plus fortement impacté par les températures et le plus responsable de la transmission de ces effets jusqu’aux performances économiques nationales : la productivité du travail (Dell & al., 2014).

Celle-ci subit l’impact d’un réchauffement des températures de l’environnement de travail à cause du stress thermique qui pèse sur les travailleurs. Ce phénomène est le processus à travers lequel la température affecte de manière néfaste la productivité du travail en passant par le fonctionnement du corps humain. Il apparaît lorsque la chaleur corporelle émise par un travailleur durant son activité ne peut pas être dispersée dans l’air ambiant du lieu de travail. Dans ce cas, le travailleur ne peut plus maintenir sa température corporelle constante et l’intensité du travail va diminuer (Kjellstrom et al., 2009). La diminution du rythme de travail agit comme un mécanisme d’auto-défense du corps pour se protéger de la chaleur ambiante.

La productivité des travailleurs est donc influencée entre-autres par les conditions de travail dans lesquelles l’activité prend place. Ce travail se concentre sur les effets de la tem-

pérature uniquement, mais les conditions affectant la productivité regroupent aussi l'ensoleillement, les précipitations, et les vents extrêmes, auxquels sont exposés les travailleurs durant la réalisation de leurs tâches. En revanche, ces conditions n'auront pas les mêmes conséquences sur les travailleurs suivant le secteur d'activité en question. Ainsi, des secteurs exerçant leurs activités en extérieur ne subiront pas la même dépendance aux conditions climatiques qu'un secteur qui se traduit par des activités uniquement intérieures. De la même manière, cette dépendance n'aura pas le même degré d'importance pour des organisations capables de "s'affranchir" de la météo via des procédés tels que la climatisation, comparé à d'autres qui ne disposent pas des ressources nécessaires à ces installations. Dans cette section, je relèverai donc les effets selon différents secteurs tels que les services, l'industrie, l'agriculture (au niveau de la productivité du travailleur agricole), et la manufacture.

Avant de commencer, il faut rappeler que la notion d'impact de la température sur la productivité du travail, physique et cognitif, avait déjà été avancée par les grecques lors de l'antiquité (Dell & al, 2014). Cependant, il s'agissait d'une idée basée sur de mauvais raisonnements, mais l'hypothèse d'un lien entre température et productivité du travail était déjà existante. Il a fallu attendre Huntington (1915) pour voir les premières preuves empiriques de cette relation. Il a étudié la variation de productivité des travailleurs dans une usine de coton en Caroline du sud et de cigares en Floride. La conclusion qu'il a pu en tirer est que la productivité des travailleurs est la meilleure durant les saisons d'automne et de printemps, avec des températures relativement douces, pour ensuite diminuer fortement au cours de l'été et de l'hiver, lorsque les températures sont les plus extrêmes (Huntington, 1915). Par la suite, un nombre de plus en plus important de chercheurs se sont essayés à étudier ces effets sur la productivité, via des expériences en laboratoires et des études empiriques, comme je vais le présenter ci-dessous.

Premièrement, il est important de noter que la productivité du travail est fortement dépendante de la température ambiante du milieu professionnel. Selon Burke & al. (2015), les performances connaissent un niveau optimal lorsque la température moyenne annuelle est de 13°C. Cette relation, de même que dans le cas des rendements agricoles, est non-linéaire entre la productivité et les niveaux de températures, d'après les études de Burke & al. (2015), Deryugina & Hsiang (2014).

De plus, elle est aussi observée à travers tous les pays, développés ou pauvres, et dans les secteurs agricoles et non-agricoles. La source de cette relation entre productivité et conditions

météorologiques est l'exposition à la chaleur qui, au delà du seuil optimal, peut entraîner une forte réduction des performances humaines tant au niveau intellectuel que physique dans la réalisation des tâches professionnelles.

2.1.1 Économies pauvres

Étant donné les conditions climatiques majoritairement chaudes au sein des pays pauvres, ceux-ci sont particulièrement vulnérables à l'augmentation des températures. Puisque la température optimale pour la productivité du travail est de 13°C (Burke & al., 2015), ces pays sont donc naturellement désavantagés par leurs températures moyennes supérieures à ce seuil. Il en résultera alors des niveaux de productivité du travail plus faibles, en comparaison avec les pays situés dans des zones climatiques plus fraîches.

Burke & al. (2015) ont fait l'hypothèse que si la productivité du travail diminue lors de périodes particulièrement chaudes et dans des lieux fortement exposés, alors la productivité agrégée d'un secteur dans son ensemble, étudié à grande échelle (région ou pays) et sur une durée relativement longue (au moins une année), ne devrait diminuer que très peu en moyenne. Ils vérifient cette idée en analysant les données de production économique de 166 pays entre 1960 et 2010. La méthode utilisée est de comparer les performances d'un pays lors d'une période plus chaude que sa température moyenne aux performances de ce même pays lors d'une période plus froide que sa moyenne. Ils découvrent que la production économique d'un pays est effectivement non-linéaire et concave avec la température, connaissant son niveau maximum à une température de 13°C, comme mentionné ci-dessus. Selon eux, tous les pays montrent cette même relation non-linéaire entre la température et la productivité du travail.

Les pays froids caractérisés par des températures annuelles sous ce seuil connaissent une amélioration de leur productivité à mesure qu'elles se rapprochent du seuil de 13°C. Au delà de celui-ci, la productivité diminue progressivement et l'effet s'intensifie avec l'élévation des températures.

Ce phénomène a donc forcément un impact plus sévère dans les pays pauvres, ceux-ci endurent des températures moyennes supérieures au seuil optimal, et étant majoritairement situés dans des climats plus chauds que les pays développés. Les économies pauvres et chaudes sont alors celles qui pâtissent le plus sévèrement du réchauffement climatique du point de vue de la diminution de la productivité du travail sur leur territoire.

Afin de déterminer l'effet, non pas sur la productivité globale d'une économie comme

l'étude ci-dessus, mais sur la productivité des secteurs fortement exposés à la chaleur, Acevedo & al. (2018) analysent cette relation dans le rapport du FMI de la même année. Ils annoncent qu'une augmentation des températures au dessus de 25°C entraîne une baisse significative de la productivité du travail dans les activités exposées à la chaleur ambiante. Les auteurs ont analysés la valeur ajoutée réelle par travailleur dans différents secteurs parmi 40 pays entre 1950 et 2012. Afin de prouver que la température a effectivement un effet sur la productivité du travail, les secteurs exposés à la chaleur devraient montrer une grande sensibilité à l'augmentation des températures tandis que les secteurs non-exposés ne le devraient pas. C'est effectivement ce qu'ils constatent, avec une diminution de 2,43% de la productivité pour 1°C supplémentaire à partir de 25°C, significatif au seuil de 1%. Cet effet néfaste est déjà présent à des températures inférieures, puisqu'une diminution de 1,91% est entraînée par une augmentation de 1°C à partir de 22°C, significatif à 1% également (Acevedo & al., 2018). Ces impacts de la chaleur surviennent directement la même année que le choc observé. Comme attendu, ces effets ne sont pas observables dans les secteurs non-exposés à la chaleur extérieure. Ceci démontre que les activités capables de se protéger des chocs de températures peuvent éviter les effets néfastes liés aux conditions météorologiques sur la productivité de leurs travailleurs.

A moyen terme, les auteurs observent l'impact 7 ans après le choc mais les résultats ne sont pas significatifs et ne prouvent donc pas l'existence d'un effet durable suite à un choc de température à un instant donné.

Maintenant qu'il est montré que seuls les secteurs exposés à la température ambiante extérieure (ou sans moyen de s'en protéger) sont impactés, il est intéressant de savoir quelles activités en souffrent le plus. Pour cela, Somanathan & al. (2015) ont étudié les variations de la productivité et de l'offre de travail en Inde suite à une augmentation des températures ambiantes du lieu de travail. Ils étudient cet impact dans le secteur industriel entre 1998 et 2008 à travers plusieurs firmes importantes et représentatives des conditions de l'emploi dans le pays. Ces industries sont celles du tissage (7% des employés d'usine en Inde), de la fabrication de vêtements (12% des employés d'usine en Inde), du laminage en acier (données de "Bhilai rail", premier producteur mondial) et du taillage de diamant (90% de la production mondiale transitent par les firmes de la ville étudiée) (Somanathan & al. 2015). Ils regroupent les données de productivité journalière des travailleurs et leur taux de présence, ainsi que les données de production annuelle, et les croisent avec les relevés de températures quotidiens des stations météo dans les mêmes villes que les usines.

Ils remarquent que l'effet sur la productivité est fortement amplifié si la firme ne dispose

pas d'un système de climatisation de l'environnement de travail, ce qui rejoint les conclusions de Acevedo & al. (2018). De manière générale, ils concluent que pour une journée où la température dépasse 27°C, un réchauffement de 1°C provoque une diminution de la productivité du travail d'une firme comprise entre 3,7% et presque 9% selon le type d'industrie. En effet, concernant la productivité, ils observent que la diminution s'élève à 3,7% pour les industries de vêtements situées dans les régions au climat doux suite à une augmentation unitaire de la température à partir de 27°C de moyenne (significatif à 5%). Pour celles situées dans la région capitale de Delhi, qui affiche des niveaux de températures extrêmes plus élevés en raison du climat et de l'activité humaine qui s'y passe, la perte s'élève à 8,7% pour un degré supplémentaire (statistiquement significatif à 1%). Tandis que pour les industries situées au même endroit mais disposant d'une climatisation, aucun effet n'est observé. Pour les firmes de l'industrie du tissage situées à Surate, un réchauffement de 1°C à partir d'une moyenne de 27°C entraîne une perte de productivité de 7,7% (statistiquement significatif à 5%).

En revanche, l'industrie de production de rails ne montre aucune réponse significative, mais cela peut être dû au processus de production qui est fortement mécanisé, ainsi qu'à la chaleur qui règne à l'intérieur de l'usine du fait de ce type d'activité industrielle (Somanathan & al, 2015).

Une nouvelle fois, les résultats montrent que les industries sans moyens de réguler la température ambiante, et sujettes aux chocs de températures, affichent de fortes pertes de productivité de leurs travailleurs.

En plus de la diminution observée sur la productivité au travail, Somanathan & al. (2015) découvrent une réduction de la présence des employés au travail lors de hautes températures. Ce phénomène d'absentéisme peut s'expliquer d'une part par une volonté du travailleur d'allouer moins de temps à l'exercice de son travail, et d'autre part par la fatigue causée par une longue exposition à la chaleur. L'effet maximum observé suite à l'augmentation de 1°C de la température moyenne hebdomadaire à partir d'un niveau de 27°C est une augmentation de l'absentéisme de 6 points de pourcentage dans la production de vêtements, et de 10 points de pourcentage dans la production de rails (statistiquement significatif à 1%). De manière générale, l'exposition durable à de fortes températures entraîne une augmentation de 1 à 2 % de l'absentéisme au travail pour une journée supplémentaire de chaleur supérieure à 25°C (Somanathan & al., 2015).

Selon les auteurs, l'effet est observable même dans les firmes possédant un système de climatisation. Ceci montre donc que l'impact sur le taux d'absentéisme dans le secteur industriel vient aussi des préférences des travailleurs sur l'allocation de leur temps, peut-être dans le

but de profiter d'une météo agréable pour accorder plus de temps aux activités de loisirs. En effet, les travailleurs n'étant pas soumis aux fortes chaleurs sur le lieu de travail décidant tout de même de réduire leur présence à l'usine permet d'affirmer qu'il ne s'agit pas seulement d'un effet causé par la fatigue liée à la chaleur.

Ces résultats sont appuyés par les conclusions de Graff Zivin & Neidel (2010), que je présenterai en détails dans la sous-section suivante.

De plus, selon ces derniers, l'emploi total dans les économies pauvres et émergentes peut subir un impact bien plus important que dans les pays développés.

En effet, la proportion des travailleurs actifs dans les secteurs fortement exposés à la chaleur y est beaucoup plus importante et représente parfois la presque totalité de la force de travail du pays, comme dans les nations de l'Afrique subsaharienne (Graff Zivin & Neidel, 2010). De plus, ces pays sont initialement soumis à de hautes moyennes de températures, les exposant donc fréquemment à de fortes chaleurs extrêmes, correspondant aux chutes les plus importantes du temps de travail quotidien.

Dans ces conditions, les conséquences sur l'emploi national des pays pauvres et émergents peuvent être dévastatrices. Afin d'illustrer cela, les auteurs donnent l'exemple du Mexique (bien qu'il ne soit pas considéré comme un pays émergent mais plutôt comme un "nouveau pays industrialisé", il a néanmoins un climat aux températures comparables aux pays pauvres ou émergents). Selon leurs calculs, l'emploi national du pays connaîtra une diminution de 2,0% d'ici 2100, sous l'hypothèse d'un réchauffement uniforme de 5°C.

Toutefois, il faut remarquer que l'exactitude de ces estimations peut être mise en question. Elles sont faites en considérant que la réponse des travailleurs mexicains aux températures est identique à celle des américains, et que les températures initiales au Mexique sont semblables à celles observées au Texas, ainsi que sous l'hypothèse que l'offre de travail est répartie de manière à trouver 49,7% de l'emploi dans les industries fortement exposées à la chaleur. Ces 2 premières assumptions ne sont pas certaines car rien ne certifie que les 2 nationalités partagent la même réponse en réaction aux températures, et il n'est pas exact que les conditions météorologiques moyennes dans tout le Mexique soient identiques à celles du Texas. La dernière hypothèse est en fait variable dans le temps et rien ne peut affirmer que cette répartition sera valable tout au long du reste du siècle.

2.1.2 Économies développées

Comme expliqué précédemment, les pays pauvres se trouvent majoritairement dans des zones climatiques chaudes, rendant la productivité du travail vulnérable à l'augmentation

des températures. A l'inverse, les pays développés sont principalement caractérisés par un climat plus doux, avec des températures plus faibles, comme le considère Acevedo & al. (2018) en prenant une température moyenne de 11°C pour étudier les économies avancées. La majorité de celles-ci ayant une température moyenne annuelle sous le seuil optimal de 13°C avancé par Burke & al (2015), les auteurs indiquent que suite à une augmentation des températures, elles subiront un impact plus faible en moyenne en raison de ce climat généralement plus tempéré. Aussi, Burke et al. (2015) voient ce résultat car peu de pays caractérisés comme développés et chauds à la fois se trouvent dans leur échantillon étudié. Toutefois, la relation non-linéaire entre productivité et élévation des températures des pays développés est significative au seuil de 10% (Burke & al., 2015), indiquant bien un effet marginal négatif du réchauffement lors de fortes températures dans ces pays.

Dans les économies développées, la majorité des travailleurs exercent leur activité dans un environnement intérieur, à l'abri des conditions météorologiques et des températures extérieures. Il est donc nécessaire d'évaluer l'impact sur la productivité d'un travailleur dans un bureau afin d'avoir une estimation de l'effet dans les pays développés.

Ainsi, Niemelä & al. (2002) ont examiné la relation de la température avec la productivité dans des environnements de travail non-exposés au climat extérieur en Finlande. Ils ont utilisé une étude de cas menée dans deux bureaux de centre d'appels, représentatifs du travail dans le milieu des télécommunications. Le premier était exposé à 2 niveaux de températures différents selon l'exposition au nord ou au sud du bâtiment, tandis que le deuxième a vu sa température ambiante diminuer grâce à un système de climatisation. En relevant et comparant les niveaux de productivité dans les zones nord et sud, ainsi que avant et après l'installation de la climatisation, les auteurs observent que les performances des travailleurs dans les bureaux se dégradent lors de températures élevées. En effet, ils concluent que entre 22 et 29°C, la productivité diminue de 1,8% pour chaque degré supplémentaire.

Les résultats d'expériences réalisées en laboratoire montrent des résultats similaires à cette étude empirique dans les centres d'appels. L'effet du niveau de température sur la productivité du travail cognitif a été étudié par Seppänen & al. (2003) en rassemblant les résultats d'une multitude d'expériences réalisées en laboratoires. Celles-ci se déroulaient de façon à ce que des individus, placés aléatoirement dans des salles de différentes températures, doivent réaliser des tâches physiques et cognitives. Ils observent alors que la productivité pour réaliser différentes tâches cognitives connaît une diminution de 2% pour chaque élévation de 1°C à partir de 25°C.

Toujours dans le travail effectué en intérieur, à l’abri des températures extérieures liées directement aux conditions météorologiques, Seppänen & al. (2006) ont analysé l’effet de la température sur la productivité des travailleurs du secteur tertiaire. Ainsi, les performances des employés sont observées via des indicateurs adaptés tels que le traitement de texte, les calculs mathématiques, la durée des appels téléphoniques du service client, et la durée totale du traitement du cas d’un client dans un centre d’appel. En comparant les résultats de 24 études de performances réalisées dans des écoles, bureaux, et laboratoires pertinents, ils calculent les variations de performances en pourcentages par rapport aux variations de températures. De cette façon, ils concluent que les performances au travail augmentent avec la température jusqu’à un seuil situé autour de 21-22°C. Ensuite, au dessus du niveau de 23-24°C, les performances diminuent avec l’augmentation des températures. Les résultats d’amélioration sont statistiquement significatifs jusqu’à 21°C, tandis que la détérioration des performances est statistiquement significative au delà de 24°C. En revanche, cette étude ne renseigne pas sur les niveaux de performances en dessous de 15°C. Ils observent également que le point d’inflexion de la courbe de performance se situe à 21,75°C, cette température étant la plus optimale pour maximiser les performances des travailleurs dans un bureau (Seppänen & al., 2006). Afin d’illustrer la perte d’efficacité engendrée par l’élévation de la température intérieure, ils calculent que le travail effectué dans un environnement à 30°C sera équivalent à 91,1% de ce qui aurait été observé à la température optimale, entraînant donc une diminution des performances de 8,9% lorsque la température s’élève de 21,75 à 30°C (Seppänen & al., 2006).

En cherchant à évaluer l’effet des conditions climatiques sur les revenus d’un pays développé, Deryugina & Hsiang (2014) arrivent à des résultats similaires pour la baisse de productivité. Ils étudient le cas des États-Unis à travers les variations de températures à l’intérieur des comtés, et cherchent l’effet des températures journalières sur le revenu annuel par personne de ces comtés américains au cours d’une période de 1969 à 2011. Ils utilisent la méthode de différences de différence, en contrôlant pour les fluctuations annuelles, les effets fixes des comtés, et les précipitations quotidiennes dans chaque comté. De cette façon, ils peuvent étudier l’effet marginal de la température d’une journée définie sur le revenu total annuel. Leurs résultats s’inscrivent dans la lignée des autres études référencées dans ce travail : les niveaux de températures ont des effets non-linéaires sur les revenus d’une économie développée. Ceux-ci s’expliquent par des effets sur ce qui détermine le revenu, c’est à dire la productivité des travailleurs, principalement. En effet, ils estiment que pour chaque augmentation de 1°C de la température moyenne journalière au delà de 15°C, la productivité moyenne d’une journée diminue presque li-

néairement de 1,68%. Ce résultat est statistiquement significatif et caractérise une journée moyenne aléatoire.

En prenant l'exemple d'une journée ayant 29°C de moyenne, ils estiment que ce jour est 23,6% moins productif qu'une journée ayant 15°C de moyenne. Ils trouvent aussi que l'impact négatif d'une journée plus chaude en semaine est plus important que lors d'une journée chaude le week-end. En effet, l'activité économique aux États-Unis est essentiellement réalisée en semaine, lorsque la majorité des secteurs effectuent leur production, dont ceux qui sont les plus exposés aux conditions météorologiques. En considérant que toute la valeur de la production économique est réalisée lors des 5 jours de la semaine, alors, si un de ces 5 jours de la semaine est très chaud et au delà de 30°C, il est en moyenne 32,7% moins productif qu'à sa température optimale.

A l'inverse, en considérant que la production est répartie de manière uniforme sur tous les jours y compris le week-end, alors la chute de la productivité d'un des 5 jours de la semaine s'élève à 45,8% s'il dépasse 30°C par rapport à s'il était à sa température optimale (Deryugina & al., 2014). Ils confirment ainsi qu'il existe bel et bien un effet néfaste de la température journalière sur la productivité des travailleurs qui y sont exposés, même dans les pays développés tels que les USA, et que ces effets ne sont pas négligeables.

Pour revenir à une étude mentionnée dans la sous-section précédente, Graff Zivin & Neidel (2010) cherchait à estimer l'impact du réchauffement climatique sur les choix que font les individus à propos de l'allocation de leur temps à des activités de travail ou de loisirs. Ils utilisent un panel de données d'enquêtes sur l'allocation du temps des américains entre 2003 et 2006, et ce pour des individus employés dans des secteurs fortement exposés aux conditions météorologiques¹, ainsi que dans des secteurs peu exposés, et pour finir pour les individus sans emplois.

En croisant ces enquêtes avec les données météorologiques journalières sur cette période, ils estiment l'effet de la température sur la répartition entre temps de travail et loisirs. Leurs résultats montrent ainsi que l'offre de travail globale regroupant tous les secteurs ne répond pas de manière significative aux hautes températures. Cet effet est observé car la majorité de l'offre de travail de l'échantillon enquêté se trouve être employée dans des secteurs peu-exposés aux fortes chaleurs (77% des répondants travaillent dans ces secteurs). Ceci est consistant avec la réalité de l'emploi aux USA, dont la grande majorité est intégrée dans des secteurs peu exposés à la météo (Graff Zivin & Neidel, 2010).

En revanche, ils observent que l'offre de travail globale des secteurs à hauts risques de fortes

1. Selon les auteurs, les secteurs fortement exposés à la température regroupent l'agriculture, l'exploitation forestière, la pêche et la chasse, les exploitations minières, la construction, l'industrie de la manufacture, du transport, et les travaux publics.

chaleurs diminue lors d'une exposition à de hauts niveaux de température. Au dessus du seuil de 85°F (29,4°C), ces secteurs fortement exposés voient leurs employés diminuer leur temps de travail progressivement avec le réchauffement. A partir de 100°F (37,7°C), la chute de l'offre de travail quotidienne est statistiquement significative et représente 59 minutes de moins que le temps de travail à une température entre 76 et 80°F (24,4 - 26,6°C) (Graff Zivin & Neidel, 2010).

Ils remarquent que cette diminution survient généralement lors de la dernière heure de la journée, reflétant bien le fait que subir une forte chaleur durant plusieurs heures entraîne de la fatigue et de l'épuisement, provoquant l'incapacité de prester une journée de travail de même durée que lors de journées fraîches. Dans les secteurs non-exposés aux fortes chaleurs, aucun effet de diminution du temps de travail n'est observée, contrairement à ce qui était vu dans les pays moins développés tels que l'Inde par Somanathan & al. (2015). Il semblerait donc que l'élévation de l'absentéisme aux USA soit une conséquence de la fatigue physique des travailleurs et non d'un choix de ceux-ci de s'octroyer plus de temps de loisirs, comme observé en Inde. Ceci est potentiellement le résultat de différences culturelles entre ces pays. De manière générale aux USA, l'effet des fortes chaleurs sur la répartition du temps des individus entre travail et loisir se montre nul pour les secteurs économiques du pays vus dans leur ensemble. Ceci s'explique car la force de travail de l'économie américaine est essentiellement concentrée dans des secteurs à faible risque d'exposition à de fortes températures, évitant donc les effets néfastes.

Cependant, les secteurs fortement exposés à la chaleur montrant une diminution du temps de travail quotidien en cas de hautes températures, cela prouve que l'activité économique est tout de même soumise aux conditions climatiques dans les pays développés, et impose des effets conséquents pour les activités non-capables de s'isoler des conditions de températures extérieures.

Ce résultat est similaire à celui de Somanathan & al. (2015) dans leur étude de la productivité en Inde, qui annonçait également une augmentation de l'absentéisme au travail dans le secteur industriel exposé aux fortes températures (même si l'effet était aussi observé dans les firmes non-exposées aux fortes chaleurs, comme expliqué ci-dessus).

Puisque la réponse des travailleurs industriels à une augmentation de la température ambiante provoque le même effet de diminution des heures prestées pour l'Inde comme pour les USA, on peut raisonnablement penser que cette réponse ne dépend pas du niveau de développement du pays. En réalité, ceci montre que les pays développés ne sont pas mieux prémunis que les autres pays pour faire face à l'augmentation des températures sur les lieux de travail dans le secteur de l'industrie.

En revanche, les différentes recherches présentées ci-dessus montrent l'importance de la cli-

matiation dans les secteurs d'activités intérieures, afin d'y défaire le lien entre température extérieure et productivité tel qu'il a été observé dans les pays développés.

De manière générale, les études présentées dans cette section estiment que la productivité des secteurs caractérisés par un travail physique et manuel, tels que l'industrie, maximisent leur productivité à une température moyenne annuelle entre 13 et 15°C. Au delà de ce seuil, la productivité des travailleurs diminue en moyenne de 1 à 2% par degré supplémentaire. La diminution s'intensifie avec les températures de plus en plus extrêmes, comme le montre Acevedo & al. (2018) avec une baisse plus importante à 25 °C qu'à 22°C. De même que les découvertes de Somanathan & al (2015) qui montrent des chutes de productivité encore plus fortes au delà de 27°C, atteignant des valeurs extrêmes dans les zones particulièrement chaudes comme les îlots de chaleurs urbains de la capitale Indienne.

Concernant les secteurs qui requièrent un travail cognitif et dont l'activité se passe en intérieur, les études relèvent un niveau de productivité des travailleurs maximale pour une exposition à des températures autour de 21 à 22°C. Ce seuil de température supérieur à celui du travail physique montre que les activités physiquement intensives préfèrent des températures plus basses, en raison du stress thermique évoqué au début de cette section. Le travail cognitif, quant à lui, préfère des températures un peu plus élevées car il ne nécessite pas le même besoin de diffusion de chaleur corporelle, étant donné les efforts moindres pour le corps.

Pour des températures supérieures à ce seuil, la productivité du travail connaît également une baisse moyenne de 1 à 2% par degré supplémentaire.

Toutes ces baisses sont observées de façon contemporaine aux réchauffements des environnements de travail, et ne montrent pas d'effet durable à moyen terme.

La chute de la productivité du travail à travers les différents secteurs est observée autant dans les économies développées, que dans les émergentes et les pauvres. Burke & al. (2015) ont comparé les réponses de la productivité au réchauffement entre 1960 et 1989, et entre 1990 et 2010, lesquelles sont pratiquement identiques. Ils en concluent alors que sur cette période, ni les pays pauvres régulièrement exposés aux vagues de chaleurs, ni les pays développés disposant de plus de richesses et de meilleures technologies, n'ont pu sauvegarder leur productivité face à la chaleur. A températures égales, un pays développé ne montre pas de capacité à mieux maintenir son niveau de productivité par rapport à un pays pauvre, démontrant donc une absence d'adaptation à la température, et un effet très similaire autour du globe.

Toutefois, les activités disposant d'un système de climatisation pour s'affranchir des températures extérieures montrent qu'elles ne subissent pas de perte de productivité. Les pays moins développés subiront donc un impact plus ou moins élevé que les économies développées selon leur capacité à s'équiper de ce genre de systèmes.

S'ils n'ont pas cet équipement, les pertes de productivité qu'ils subiront seront bien supérieures aux économies développées, en raison de leurs températures initiales majoritairement supérieures aux seuils de températures idéaux.

2.2 Productivité globale des facteurs

Comme il est expliqué via les études ci-dessus, la productivité du travail se trouve être significativement affectée par l'élévation des niveaux de températures. Mais il a aussi été observé par Letta & Tol (2016) que la productivité globale des facteurs (ci-après PGF) est également impactée. Ceux-ci testent l'hypothèse selon laquelle les chocs annuels de température affectent les taux de croissance de la PGF des pays. Cette dernière est un élément essentiel pour le développement à long terme d'un pays. En agissant dessus, le réchauffement entraînerait alors un ralentissement du développement économique des pays impactés sur le long terme.

Ils utilisent un panel d'observation des températures et précipitations annuelles de 60 pays entre 1960 et 2006. Les changements annuels de précipitations sont ici intégrés et utilisés comme variable de contrôle afin d'éviter un biais de variable omise dans le cas de leur absence. Ils incluent aussi dans leur régression les effets fixes des pays et les effets fixes des régions dans le temps. De cette manière, ils découvrent tout d'abord que la relation entre l'augmentation des températures et la croissance de la PGF est négative. En effet, une augmentation annuelle de 1°C provoquerait une diminution du taux de croissance de la PGF de 0,49 points de % en moyenne dans le monde, significatif au seuil de 5% (Letta & Tol, 2016). Cependant, cet effet est non-linéaire (tout comme ceux observés précédemment) et l'étude ne renseigne pas sur la température à partir de laquelle cette diminution est observée.

En allant plus en profondeur, ils intègrent une variable muette de pauvreté² pour interagir avec le changement de température. Ce changement leur montre que les effets négatifs de cette relation sont en fait majoritairement concentrés dans les pays pauvres. Ainsi, l'augmentation annuelle de 1°C donnerait lieu à une baisse du taux de croissance de la PGF dans les pays pauvres de 1,7 points de %, statistiquement significatif au seuil de 1%.

2. Les auteurs considèrent un pays comme étant pauvre s'il a un PIB par tête inférieur au PIB médian lors de la première année du panel utilisé.

Afin de cerner la relation du mieux possible, ils font une nouvelle régression en faisant interagir les variations de températures avec une variable muette de pays chaud.³ Le résultat obtenu montre toujours un effet négatif, bien que moins important et moins significatif. Une première explication à cela est que la diminution du taux de croissance de la PGF suite à l'augmentation des températures vient du fait d'être pauvre, mais aussi du fait d'être initialement un pays chaud. Ces deux éléments ayant chacun un effet néfaste sur la croissance de la PGF.

La seconde explication est que les pays pauvres sont majoritairement les mêmes que les pays chauds vu leur situation géographique (comme il a été mentionné dans le chapitre précédente), donc l'inclusion de la variable muette "chaud" serait corrélée aux impacts étudiés sur les pays pauvres.

Une troisième explication pour justifier l'impact négatif causé par le fait d'être un pays pauvre s'appuie sur la plus grande part qu'occupe le secteur agricole dans le PIB des pays pauvres en comparaison avec les pays développés, sur la quantité plus importante de travail ayant lieu en extérieur dans ces pays, et donc sur leur plus faible capacité à s'affranchir des conditions météorologiques sur le lieu de travail (Letta & Tol, 2016).

3. Un pays est considéré comme chaud s'il a une température moyenne supérieure à la médiane durant les 10 premières années de la période observée

2.2.1 Tableau récapitulatif des impacts sur la productivité du travail et la productivité globale des facteurs

<i>Impact des températures sur la productivité du travail</i>				
Étude	Catégorie de pays	Élément impacté	Impact observé	Variation de température
Acevedo & al. (2018)	Pays pauvre	Productivité	-1,91% -2,43%	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
Somanathan & al. (2015)	Pays pauvre	Productivité du secteur « Vêtements »	-3,7% -8,7%	+1°C à partir de 27°C (Hyderabad) +1°C à partir de 27°C (Delhi)
		Productivité du secteur « Tissage »	-7,7%	+1°C à partir de 27°C (Surate)
		Absentéisme du secteur « Vêtements »	+6 points de %	+1°C à partir de 27°C
		Absentéisme du secteur « Rails »	+10 points de %	+1°C à partir de 27°C
Graff Zivin & Neidel (2010)	Pays pauvre	Emploi national	-2%	+5°C en 2100
	Pays développé	Absentéisme du secteur exposé à la météo	+59 min/jour	Une journée à 26,6°C → 37,7°C
Letta & Tol (2016)	Partout	Croissance de la PGF	-0,49%	+1°C de la moyenne annuelle (Pas de seuil mentionné)
	Pays pauvre		-1,5 points de %	
Niemelä & al. (2002)	Pays développé	Productivité	-1,8%	+1°C entre 22°C et 29°C
Seppänen & al. (2003)	Pays développé	Productivité	-2%	+1°C à partir de 25°C
Seppänen & al. (2006)	Pays développé	Productivité	Niveau maximal	Seuil de 21,75°C
			-8,9%	Une journée à 21,75°C → 30°C
Deryugina & Hsiang (2014)	Pays développé	Productivité	-1,68%	+1°C à partir de 15°C

2.3 Investissement

L'investissement total d'une économie est un élément déterminant de sa croissance, qui agit par le biais de son effet sur le taux d'accumulation des facteurs de production. En effet, il détermine l'évolution du stock de capital, qui lui même déterminera en partie les capacités et le niveau de production d'un pays (ces relations seront développées dans une prochaine section).

Selon Dell & al. (2008), Lee & al. (2016) et Acevedo & al. (2018), une augmentation des températures affecte négativement et de manière importante le taux d'investissement d'une économie pauvre, réduisant donc le niveau de production et la croissance économique de manière durable.

Cette baisse peut-être due à plusieurs raisons (Acevedo & al., 2018) :

- Suite au réchauffement, le niveau de production de plusieurs secteurs chute, comme il est expliqué dans la section "production" (chapitre 3), de même que le niveau de revenu par habitant d'une économie. Il est donc probable qu'il y ait moins de ressources à investir et donc un ralentissement de l'investissement global du pays.
- La diminution de la production des secteurs malgré le même stock de capital physique disponible pour les firmes signifie que le taux de rendement du capital est amoindri. Ceci diminue l'incitation à investir d'avantage de capital.
- La baisse du niveau de revenu a pour conséquence d'augmenter le coût relatif pour financer un investissement.

Selon Hallegatte & al. (2016) (cité par Acevedo & al., 2018), les conséquences du réchauffement climatique ont des répercussions sur l'investissement au niveau microéconomique des ménages. La survenance des catastrophes naturelles (ouragans, inondations, incendies,...) étant plus fréquente en raison du changement climatique, les ménages préfèrent investir moins afin de lisser leur consommation, en raison des incertitudes quant aux revenus futurs ou aux désastres probables auxquels ils devront faire face. Ils voient donc l'investissement de leur épargne comme trop risqué.

Cette conclusion de Hallegatte & al. (2016) explique donc en partie l'impact négatif de la hausse des températures sur l'investissement global d'une économie.

Dans le but d'étudier la relation non-linéaire entre les variations des conditions météorologiques et la croissance économique (comme annoncée par Burke & al., 2015), Lee & al. (2016) analysent les variations de températures et précipitations dans 168 pays entre 1960 et 2014.

Ils observent que des accroissements des niveaux de températures ont bel et bien un impact négatif significatif sur les investissements globaux d’une économie. En raison du grand nombre de pays observés, la magnitude de cette baisse d’investissement est petite, bien que négative, car elle reflète la moyenne de l’impact à travers les pays à tous stades de développement et de richesse. L’effet est donc lissé pas les économies développées, sur lesquelles aucun effet n’est observé pour l’investissement.

Afin de rendre-compte plus précisément de la diminution subie par les pays les moins développés, il faut relever les résultats obtenus par Acevedo & al. (2018). Ceux-ci observent que la réduction de l’investissement survient uniquement dans les pays pauvres et en développement, non dans les pays développés. Aussi, celle-ci n’est pas statistiquement significative dans l’observation de l’effet immédiat lors de la même année que le choc de température. La baisse devient statistiquement significative lorsqu’ils observent l’effet à moyen terme, 7 ans après l’augmentation unitaire de la température moyenne annuelle nationale.

Plus précisément, un pays en développement ayant une moyenne annuelle de 22°C subira une réduction de son investissement de 4,22 points de % en moyenne, suite à un réchauffement d’un degré de sa moyenne annuelle (statistiquement significatif à 5%). Pour un pays pauvre et plus chaud, caractérisé par une moyenne de 25°C par an, l’impact négatif sera de 5,87 points de % en moyenne (statistiquement significatif à 1%) (Acevedo & al., 2018).

En reprenant les scénarios du GIEC sur l’évolution probable du climat au cours du XXIème siècle, l’investissement privé sera plus faible en moyenne de 5% en 2100 sous l’hypothèse de réalisation du RCP4.5, comparé à une absence de réchauffement.

Dans le cas le plus pessimiste de réchauffement non-réglementé RCP8.5, l’investissement privé sera réduit de 11% à la fin du siècle par rapport à un monde sans réchauffement (Acevedo & al., 2018).

L’impact de la température sur la croissance de l’investissement (et non simplement sur son niveau immédiat lors de l’exposition à la chaleur) est aussi observé par Dell & al. (2008). Le but de leur travail est d’étudier la relation historique qui lie l’économie d’un pays aux températures et précipitations sur son territoire. Ils se basent sur un échantillon de 136 pays observés entre 1950 et 2003.

Ils découvrent, conformément aux études citées ci-dessus, que seuls les pays pauvres subissent l’effet néfaste, à raison d’une baisse moyenne du taux de croissance de l’investissement de 3 points de % (statistiquement significatif à 5%) pour un degré supplémentaire de la moyenne annuelle (Dell & al., 2008).

2.3.1 Tableau récapitulatif des impacts sur l'investissement

<i>Impact des températures sur l'investissement</i>				
Étude	Catégorie de pays	Élément impacté	Impact observé	Variation de température
Acevedo & al. (2018)	Pays pauvre	Investissement	-4,22 points de % (7ans après) -5,87 points de % (7 ans après)	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
			-5% -11%	Entre +2,3 et +2,9°C en 2100 par rapport à 1900 Entre +4,1 et +4,8°C en 2100 par rapport à 1900
	Pays développé		Pas d'effet	+1°C à partir de 11°C de moyenne/an
Dell & al. (2008)	Pays pauvre	Investissement	-3 points de %	+1°C de la moyenne annuelle (seuil non précisé)
	Pays développé		Pas d'effet	

Chapitre 3

Impacts sur les performances économiques

3.1 Production

Il a été montré dans le chapitre précédent que la productivité du travail diminue avec l'augmentation des températures sur les lieux d'activité professionnelle exposés aux conditions météorologiques. La productivité est un élément déterminant du niveau de production des firmes, lequel varie de manière proportionnelle avec cette première. Les hausses de températures vont donc avoir un impact sur la production d'une économie via, entre autres, les performances de ses travailleurs. Les études présentées ci-dessous démontrent ces effets sur le niveau de production des économies pauvres et développées.

Avant tout, Burke & al (2015) montrent que la majorité de la production économique mondiale est réalisée dans des zones affichant des températures proches de ce niveau optimal de 13°C. Ils voient également que les économies des pays répondent de manière non-linéaire aux températures, et ce de manière relativement similaire indépendamment du fait d'être une économie développée ou non. Toutefois, les pays pauvres des régions tropicales montrent des réponses d'amplitude plus élevée, non pas car ils sont pauvres mais car ils subissent des températures moyennes plus élevées (Burke & al., 2015).

De manière globale, la relation non-linéaire et concave avec les températures amène le niveau de production à diminuer lors des moments les plus chauds et dans des endroits particulièrement chauds. En regroupant les données à l'échelle d'un pays, la production des moments plus tempérés et des régions généralement fraîches va mitiger les réductions

abruptes des températures extrêmes. La production agrégée au niveau national et annuel diminuera donc de manière modérée avec l'augmentation des températures moyennes nationales (Burke & al., 2015).

3.1.1 Économies pauvres

Les découvertes de Hsiang (2010) tendent à confirmer l'hypothèse selon laquelle les effets néfastes observés sur l'économie sont causés principalement par la réduction de la productivité du travail lorsque les travailleurs sont exposés à de hautes températures, qui était aussi la conclusion de Dell & al. (2014).

En effet, il montre que l'effet sur la production économique suite à une augmentation de température est similaire à celui sur la productivité du travail en cas de fortes chaleurs. Comme mentionné dans le premier chapitre, il utilise des données de variations années après années des températures en surface dans 28 pays des caraïbes et d'Amérique centrale, ainsi que des données de tempêtes tropicales et ouragans survenus dans ces régions entre 1970 et 2006.

Afin d'étudier uniquement l'effet des températures locales sur l'économie, ainsi que sur la productivité, il estime l'impact économique des catastrophes climatiques et le soustrait de l'effet estimé des températures. De cette manière, l'effet résultant est bien celui causé par les températures ambiantes uniquement, et non celui des tempêtes tropicales évalué par les températures en guise de variable muette. En effet, il a été démontré que la survenance des tempêtes tropicales dans la région étudiée est liée avec les températures tropicales locales depuis 1950 (Mann & Emanuel, 2006 ; Elsner & al., 2008, cités par Hsiang, 2010).

Selon Hsiang (2010), l'augmentation des températures moyennes annuelles provoque une baisse de la production totale d'un pays, ainsi qu'une baisse de la production dans 3 activités non-agricoles. Ses résultats sont les suivants, pour une augmentation de 1°C de la température :

- Diminution de la production nationale totale de 2,5% (significatif à 5%)
- Diminution de la production des secteurs horeca et du commerce de 6,1% (significatif à 1%)
- Diminution de la production des secteurs de l'industrie minière et des travaux publics de 4,2% (significatif à 10%)
- Diminution de la production des autres secteurs (hors transports et communications, manufacture, construction, agriculture, chasse et pêche) de 2,2% (significatif à 5%)

Les impacts dans ces secteurs sont fortement responsables de la diminution de la production

totale du pays car ils représentent plus de la moitié de la production agrégée de tous les secteurs. Dans ces 28 pays des caraïbes, les 3 catégories de secteurs relevées ci-dessus valent ensemble, en moyenne, 59,6% de la production nationale (Hsiang, 2010).

La forte diminution de la production dans des secteurs ayant un poids important dans l'économie nationale représente donc un risque sérieux pour les pays d'Amérique centrale et des caraïbes de cette étude.

En allant plus loin, Hsiang (2010) montre que les pertes subies sont nulles ou presque lorsque les températures augmentent à partir de climats frais, et deviennent lourdes lorsque le réchauffement survient à partir de climats initialement chauds, montrant ainsi l'aspect non-linéaire de cette relation. Les pertes de production les plus importantes sont donc observées lors des années ayant beaucoup de jours anormalement chauds, et ce durant la saison la plus chaude.

Ainsi, il montre qu'à des températures inférieures à 27°C seule la production totale du pays montre une réponse à l'élévation des températures, tandis que les secteurs précédemment cités ne montrent pas de réponse statistiquement significatives. Cette diminution de la production totale nationale est probablement due à la baisse de production endurée par d'autres secteurs à ces niveaux de températures, tels que l'agriculture. Cette hypothèse est consistante avec les résultats de Acevedo & al. (2018) qui relève des baisses de rendements à partir de 22°C dans ce secteur.

Entre 27 et 29°C, les secteurs de l'horeca et du commerce montrent des effets négatifs statistiquement significatifs suite à un réchauffement de 1°C, de même que le secteur des transports et communications. Pour finir, au delà de 29°C les autres secteurs¹ montrent eux aussi des effets significatifs, lesquels sont plus sévères pour l'ensemble des secteurs (Hsiang, 2010).

Concernant le secteur industriel dans son ensemble, il a été montré par le travail de Dell & al. (2012) (qui a été présenté dans le premier chapitre) que la croissance de la production de l'industrie est ralentie de 2,04% pour chaque degré supplémentaire de la moyenne d'un pays (significatif au seuil de 5%). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Hsiang (2010) expliqués ci-dessus. Cependant, comme leur conclusion pour l'agriculture, cet effet est visible seulement dans les pays pauvres.

Toutefois, l'étude ne précise pas à partir de quel seuil de température ces effets sont observés.

Afin de confirmer cette relation et son ampleur, il faut regarder les résultats de Jones &

1. hors transports et communications, manufacture, construction, agriculture, chasse et pêche

Olken (2010), qui tentent de déterminer les pertes de la production industrielle via l'étude des données de commerce mondial. Ils trouvent alors qu'une augmentation de 1°C de la moyenne annuelle dans un pays pauvre provoque une réduction de la croissance des exportations entre 2,0 et 5,6 points de %. Cet impact est surtout concentré sur les produits agricoles et de manufacture. En moyenne, sur l'ensemble des produits exportés, le ralentissement est de 2,4 points de % pour les pays pauvres (statistiquement significatif à 1%). Mais ce résultat est à interpréter avec précaution car il ne vaut pas pour toutes les exportations, mais 20 des 66 catégories identifiées de produits exportés montrent une diminution statistiquement significative. De plus, il n'est pas précisé le seuil de température à partir duquel cette diminution survient.

Un argument supplémentaire pour démontrer l'impact négatif que subit la production des pays pauvres est donné par Acevedo & al. (2018), qui a été brièvement abordé dans une section précédente. Ils montrent qu'en cas de réchauffement, les pays chauds subissent une baisse de la production par habitant à court et à moyen terme.

En analysant les données de 180 pays entre 1950 et 2015 et leurs relevés de variations annuelles de températures et précipitations, ils étudient comment la production totale d'une économie répond aux chocs météorologiques, et à travers quels mécanismes. Ils découvrent que les effets macroéconomiques des chocs de températures ne sont pas égaux entre les pays, ni même à l'intérieur de ceux-ci. Sans surprise, leurs résultats confirment la relation non-linéaire déjà expliquée dans ce travail.

Ainsi, le réchauffement des températures entraîne une diminution de la production par habitant dans les pays soumis à de hautes températures moyennes annuelles. Il est important de constater à fortiori que ces pays sont généralement des économies pauvres, comme il a été précisé précédemment. Les effets néfastes qu'ils subissent sont durables et impactent l'économie à moyen terme, à travers des mécanismes tels qu'un plus faible rendement agricole et une plus faible productivité du travail dans les secteurs exposés à la chaleur, comme il a été expliqué dans les chapitres précédents. Les auteurs avancent aussi l'hypothèse de 2 mécanismes supplémentaires : moins d'accumulation du capital et une détérioration des conditions de santé. Ces sujets seront abordés brièvement dans le dernier chapitre.

Acevedo & al. (2018) calculent que dans le cas d'un réchauffement climatique non-endigué et sous l'hypothèse que les températures ont des effets uniquement sur les niveaux de production par habitant (sans tenir compte d'un effet de croissance), le PIB/habitant d'un pays pauvre en 2100 sera de 9% inférieur à son niveau sans changement climatique. Ainsi, ils estiment que pour les pays pauvres, une diminution de la production par habitant

de 0,9 points de pourcentage est attendue pour une augmentation de 1°C à partir d'une moyenne annuelle de 22°C. Pour des pays encore plus chauds avec une moyenne annuelle de 25°C, la diminution attendue est de 1,2 points de pourcentage (Acevedo & al., 2018). Ces résultats ont lieu au cours de la même année que le choc de température, et sont tous deux statistiquement significatifs au seuil de 1%.

Ceci montre que l'ampleur de l'impact dépend fortement de la température moyenne annuelle initiale du pays. De cette façon, un pays ayant une température moyenne annuelle plus élevée que celles citées ci-dessus subira une perte de sa production par habitant encore plus sévère, suite à un réchauffement d'un degré. A l'inverse, un pays ayant des températures moyennes en deçà du niveau optimal définis précédemment par Burke & al. (2015) verra sa production par habitant s'améliorer avec un réchauffement de un degré (Acevedo & al., 2018).

En étudiant l'effet à moyen terme, les résultats montrent que 7 années après un choc de température de 1°C, la production par habitant subit toujours une diminution, et que celle-ci est même plus importante. Elle équivaut à 1,1 points de pourcentage (significative à 10%) dans les pays ayant minimum 22°C de température moyenne annuelle. Cette diminution s'élève à 1,6 points de pourcentage (significative à 5%) pour les pays avec 25°C de moyenne annuelle (Acevedo & al., 2018). Ces résultats suggèrent que l'effet des températures sur la production n'est pas seulement un effet de diminution du niveau immédiat, mais est aussi un effet sur la croissance des capacités de production. De cette façon, le choc survenu diminue de manière permanente la frontière des possibilités de production d'une économie. L'idée d'effets des températures sur la croissance de la production, et non uniquement sur le niveau immédiat, est aussi évoquée par Dell & al (2012) et Burke & al. (2015).

De plus, étant donné que les chocs de températures disparaissent lentement, et de façon encore plus lente dans les climats initialement chauds, un réchauffement de la température moyenne annuelle de 1°C provoque une exposition à des températures plus élevées que la moyenne habituelle lors des années suivant le choc (Acevedo & al., 2018). Il est donc tout à fait probable que la baisse des capacités de production combinée avec la résurgence de températures supérieures à la moyenne les années suivantes, provoquent un effet néfaste légèrement plus important sur le niveau de production à moyen-terme.

Pour les activités du secteur de la manufacture en particulier, leur production diminue uniquement dans les pays chauds. En effet, un réchauffement de 1°C à partir d'une moyenne annuelle de 22°C provoque une diminution de presque 1% de la production de la manufacture la même année. A partir d'une moyenne annuelle de 25°C, la diminution est de presque 1,3%.

Ces effets sont tous deux statistiquement significatifs au seuil de 5% (Acevedo et al., 2018). En revanche, l'étude de l'impact à moyen terme ne montre pas d'effet significatif 7 années après le choc de température. Selon cette étude, il semblerait donc que la baisse de la production par habitant à moyen terme expliquée ci-dessus ne soit pas causée par une baisse à moyen terme de la manufacture.

Dans le cas du secteur des services, on peut observer une diminution moyenne de la production de 0,5% dans un pays ayant une température moyenne annuelle égale à 22°C, et une diminution de 0,6% pour une moyenne de 25°C, suite à un réchauffement de 1°C (Acevedo & al., 2018). Toutefois, ces résultats sont significatifs au seuil de 10% et les auteurs les interprètent comme un signe de protection du secteur des services face à la température. Ceci est en accord avec les résultats présentés dans la section 2.1 sur la productivité du travail. En effet, le secteur des services regroupe majoritairement des activités nécessitant un travail cognitif, lequel connaît sa température optimale à 21,75°C et ne subit un impact néfaste qu'à partir de 23-24°C (Seppänen & al., 2006). De plus, les activités des services sont généralement exercées dans des environnements intérieurs, où on peut supposer la présence de climatisation qui empêche les températures extérieures d'avoir un impact sur la productivité, et donc par extension sur la production.

Un nouveau résultat que l'on peut retenir de cette étude est l'analyse de l'évolution du PIB d'un pays suivant les scénarios de réchauffement du climat et de concentration des GES du GIEC.² Dans le scénario RCP4.5 qui prévoit une diminution des émissions de GES à partir de 2045/2050, causant un réchauffement de 2,3 à 2,9°C³ en 2100 par rapport au niveau du XIXème siècle (entre 1850 et 1900), un pays pauvre et chaud (température moyenne annuelle de 25°C) verra son PIB réduit de 4% en 2100 par rapport à son évolution sans réchauffement (Acevedo & al., 2018). Concernant le scénario RCP8.5 de réchauffement non-contrôlé, la trajectoire envisagée est la pire prévision possible, prévoyant une augmentation continue des émissions de GES durant le reste du siècle, et causant un réchauffement de 4,1 à 4,8°C en 2100 par rapport au niveau entre 1850 et 1900.⁴ Dans ce cas, ce même pays verra alors son PIB réduit de 9% en 2100 en comparaison avec un monde sans élévation des températures (Acevedo & al., 2018). Ces résultats sont cependant fort incertains, en raison

2. Ces scénarios appelés les "Representative Concentration Pathway" (RCP) sont des trajectoires probables de concentration des gaz à effets de serre d'ici 2100 suivant les émissions de GES dans les prochaines années. Ils ont été utilisés par le GIEC dans son 5ème rapport en 2014.

3. IPCC, 2014 : Summary for Policymakers. In : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Edenhofer & al.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

4. Source identique au scénario ci-dessus

de l'imprécision des estimations d'impact d'un choc de température, et de l'incertitude des scénarios d'évolution réelle des émissions et concentrations des GES, ainsi que des températures.

En prenant le cas de l'Inde dans l'étude de Somanathan & al. (2015) présentée dans le chapitre précédent, une baisse de 3,1% de la production est observée en réponse à une augmentation de 1°C de la température moyenne annuelle à partir d'un niveau de 25°C. Ce résultat est en accord avec le reste de la littérature présenté ci-dessus.

Cette baisse est hétérogène à travers les différentes industries étudiées. En effet, l'impact le plus fort est observé dans les industries utilisant intensivement la force de travail, tandis que le plus faible est observé dans les industries consommant beaucoup d'électricité (reflétant la consommation électrique pour le système de climatisation, et pour l'activité productive mécanisée qui remplace le besoin en travailleurs). La plus forte baisse de production remarquée ici dans les industries employant intensivement le capital humain montre qu'il s'agit bien d'une conséquence de la baisse de productivité du travail et du nombre d'heures prestées suite à de fortes chaleurs.

En plus de calculer l'impact attendu dans les prochaines décennies, les auteurs ont calculé l'impact actuel du réchauffement observé en Inde sur la production de la manufacture. En comparant les relevés de températures de la période 1971-1975 et 2005-2009, ils observent que l'Inde a connu un réchauffement moyen de 0,91°C sur ces 30 années. Selon eux, ce réchauffement a causé en 2009 une diminution de 3% de la production de la manufacture par rapport au niveau qu'elle aurait atteint en l'absence de réchauffement. Cette activité industrielle représentait près de 15% du PIB du pays en 2012 (Somanathan & al., 2015).

Afin de représenter l'énorme perte subie par l'industrie indienne en raison du seul réchauffement de ces dernières décennies, les auteurs avancent le chiffre de \$8 milliards de perte annuelle dans l'industrie de la manufacture (Somanathan & al., 2015).

Au vu d'un réchauffement probable de 3,4 à 4,8°C en Inde d'ici 2080 (Chaturvedi & al., 2012, cités par Somanathan & al., 2015), les pertes potentielles à venir pour l'industrie du pays sont colossales.

3.1.2 Économies développées

Comme il a été expliqué à travers les sections précédentes de ce travail, les pays développés montrent une réponse non-linéaire aux augmentations de températures similaire à celle des pays pauvres et en développement (Dell & al., 2012 ; Deryugina & al., 2014 ; Burke & al., 2015). Il a été montré dans le premier chapitre que la production du secteur agricole

diminue avec l'augmentation des températures au delà de certains seuils spécifiques selon les types de culture. Cependant, le poids de ce secteur dans la production nationale totale des économies développées est très faible (0,9% du PIB des USA en 2017 (Banque Mondiale, 2017)). La diminution que le secteur subit avec le réchauffement n'est donc pas visible dans la niveau de production nationale.

En prenant le secteur de la manufacture, qui représentait 11,1% du PIB des États-Unis en 2017⁵ et pourrait donc avoir un impact sur la production nationale du pays, Acevedo & al. (2018) ne trouvent pas d'effet négatif et statistiquement significatif dû à de hautes températures. Ceci laisse supposer que ce secteur dispose des moyens permettant de s'isoler des conditions météorologiques extérieures, et ainsi de sauvegarder son niveau de productivité. Alors, la production du secteur ne s'en trouve pas affectée par un réchauffement des températures à l'extérieur du lieu de travail des firmes de ce secteur.

Le secteur de l'industrie en général représentait 18,2% du PIB américain en 2017⁶ et pourrait, tout comme supposé pour la manufacture, avoir un impact important sur la production agrégée du pays. Cependant, Dell & al. (2012) ne distinguent aucun effet négatif significatif sur la croissance de la production industrielle dans les pays développés.

Malgré cette conclusion générale sur l'industrie prise dans son ensemble, on peut remarquer l'existence d'impact sur des activités particulières de l'industrie. En effet, aux États-Unis, Cachon & al. (2012) (cités par Dell & al., 2012) utilisent les données de 64 usines automobiles du pays entre 1994 et 2004. En les croisant avec les relevés de températures correspondant à cette période et sur les lieux de production, ils calculent qu'une semaine ayant presque entièrement (minimum 6 jours) des températures supérieures à 90°F (32,2°C) entraîne un niveau de production 8% inférieur à la moyenne des semaines en dessous de cette température. Ce résultat montre que l'absence d'impact sur la production totale de l'ensemble du secteur cache en réalité des impacts négatifs de l'augmentation des températures sur certaines firmes qui ne disposent pas de la protection nécessaire vis-à-vis des conditions climatiques. Mais, selon les observations des études recensées dans ce travail, ces activités industrielles vulnérables au climat ne sont pas majoritaires dans les pays développés, car le secteur industriel ne présente pas de baisse significative de sa production en réponse à un réchauffement des températures dans ces régions.

Le secteur ayant le plus de poids dans le PIB des économies développées est le secteur

5. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.IND.MANF.ZS?locations=US>

6. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.IND.TOTL.ZS?locations=US>

tertiaire. En raison des activités économiques qui le composent, sa production ne montre pas de réponse négative aux chocs de températures. En effet, comme expliqué dans la sous-section précédente, les activités des services semblent être protégées des effets néfastes des hausses de températures même dans les pays pauvres (Acevedo & al., 2018). Il est donc très fortement probable que les pays développés disposent eux-aussi des moyens nécessaires pour protéger la production de ce secteur.

Ainsi, puisque la production du secteur a généralement lieu dans des environnements intérieurs protégés des chocs de températures par des systèmes comme la climatisation, la productivité des travailleurs ne souffre pas du réchauffement extérieur. Par conséquent, la production ne subit pas d'impacts négatifs dans les économies développées.

Celles-ci voient donc leur activité économique la plus productrice de richesse non-affectée par le réchauffement climatique.

Au niveau de la production par habitant, Acevedo & al. (2018) trouvaient une baisse dans les économies pauvres et en développement, mais cet impact est observé uniquement dans ces pays. En effet, ils ne découvrent pas de relation négative avec la montée des températures dans les pays développés.

Du moins, ce résultat est atteint car ils considèrent que ces pays ont une température moyenne annuelle de 11°C, comme mentionné précédemment. En réalité, la relation entre la production par habitant d'une économie et les variations de températures s'explique comme suit :

Pour des températures moyennes annuelles inférieures au seuil optimal de 13 à 15°C défini par Burke & al. (2015), un réchauffement d'un degré de cette moyenne permettra une augmentation de la production par habitant. A l'inverse, si les moyennes annuelles sont supérieures à ce seuil, l'effet contraire est observé (Acevedo & al., 2018).

De cette manière, les économies développées et situées dans des climats froids pourraient légèrement bénéficier du réchauffement par un accroissement de leur production nationale. Cependant, cet effet est valide à court terme, car une augmentation continue des températures qui les pousse à atteindre des moyennes annuelles supérieures au seuil optimal provoquerait un effet néfaste pour les activités non-isolées des températures extérieures.

On peut donc remarquer qu'il y a une certaine tendance dans les résultats de ces études. Selon leurs calculs, l'impact d'une hausse de la température de 1°C sur la production nationale est approximativement une diminution de 2% (Dell & al., 2014). En effet, à l'exception

des résultats de Acevedo & al. (2018) qui annoncent une baisse de la production par habitant et de la production de la manufacture autour de 1% en moyenne par degré supplémentaire, il semble y avoir un consensus autour de 2% d'impact négatif moyen sur la production pour une journée exposée à des températures supérieures à 25°C.

De plus, ce résultat est très proche de celui des études sur la productivité du travail. En effet, celles-ci estimaient l'impact d'un degré supplémentaire à partir d'une exposition à 25°C à une diminution moyenne entre 1 et 2% de la productivité. Cette similarité dans l'ampleur de l'impact démontre que la variation de la productivité du travail est bien l'élément qui influence le plus la variation de la production nationale, suite à une élévation des températures.

3.1.3 Tableau récapitulatif des impacts sur la production

<i>Impact des températures sur la production économique</i>				
Étude	Catégorie de pays	Élément impacté	Impact observé	Variation de température
Hsiang (2010)	Pays pauvre	Production nationale	-2,5%	+1°C de la moyenne annuelle
		Production de l'horeca et du commerce	-6,1%	
		Production de l'industrie minière et travaux publics	-4,2%	
		Production des autres secteurs	-2,2%	
Dell & al. (2012)	Pays pauvre	Production industrielle	-2,04%	+1°C de la moyenne annuelle
	Pays développé		Pas d'effet significatif	
Jones & Olken (2010)	Pays pauvre	Croissance des exportations	-2,4%	+1°C de la moyenne annuelle
Acevedo & al. (2018)	Pays pauvre	PIB	-4% -9%	Entre +2,3 et +2,9°C en 2100 par rapport à 1900 Entre +4,1 et +4,8°C en 2100 par rapport à 1900
		PIB/habitant	-0,9 points de % -1,2 points de %	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
		PIB/habitant (7 ans après)	-1,1 points de % -1,6 points de %	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
		Production de la manufacture	-1 point de % -1,3 points de %	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
		Production de la manufacture (7 ans après)	Pas d'effet	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
		Production des services	-0,5 points de % -0,6 points de %	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
	Pays développé	Production de la manufacture	Pas d'effet négatif significatif	+1°C à partir de 11°C de moyenne/an
		Production des services		
		PIB/habitant		
Somanathan & al. (2015)	Pays pauvre	Production	-3,1%	+1°C à partir de 25°C de moyenne/an

3.2 Revenus

Le réchauffement climatique d'ici 2100 aura un impact important sur la production économique des pays, comme le montre Burke & al. (2015). On peut donc supposer qu'un impact sera aussi visible sur le niveau de revenu des économies tout autour du globe.

En effet, selon l'hypothèse de réchauffement non contrôlé par des mesures environnementales (RCP8.5) et de forte croissance (SSP5⁷) menant à un accroissement des températures entre 4,1 et 4,8°C en 2100 par rapport à la fin du XIX^{ème} siècle, une diminution de 23% des revenus moyens mondiaux est attendue d'ici la fin du siècle, en comparaison avec une situation sans réchauffement du climat (Burke & al., 2015).

Même si ce résultat diffère selon le modèle de réchauffement futur utilisé et la prise en compte ou non des impacts à long terme, une perte mondiale moyenne d'au moins 20% est certaine avec une probabilité de 0,44 à 0,87 (Burke & al., 2015).

Bien sûr, cette réduction des revenus n'aura pas la même sévérité selon les pays et les populations. Les inégalités de revenus à travers le globe s'en retrouveront encore plus larges. Le résultat de cette étude peut donc être interprété de cette manière :

En 2100, par rapport à un monde sans réchauffement climatique, 77% des pays seront plus pauvres au niveau du revenu par habitant, si le réchauffement évolue de manière non contrôlée selon les scénarios décrits ci-dessus (Burke & al., 2015).

La situation pourrait même être pire, avec un appauvrissement de certains pays en 2100 par rapport à leur niveau de revenu par habitant actuel :

Sous la même hypothèse de réchauffement non contrôlé (RCP8.5) et de forte croissance (SSP5), 5% des pays seront plus pauvres à la fin du siècle qu'actuellement (Burke & al., 2015).

Dans le cas d'une croissance plus faible (SSP3⁸), le nombre de pays qui seront plus pauvres en 2100 par rapport à aujourd'hui s'élève à 43% des nations du monde (Burke & al., 2015).

De la même manière que l'influence qu'elles exercent sur les niveaux de revenus entre les pays, les températures ont évidemment aussi un impact sur le revenu à travers les différentes régions d'un même pays. Dell & al. (2009) le découvrent en utilisant les données de revenu annuel par habitant et les relevés de températures, au niveau sous-national (plus

7. Scénario d'évolution socio-économique centré sur un développement rapide des pays émergents basé sur une grande consommation d'énergie et d'émissions de CO₂, défini par une forte croissance et une rapide convergence des niveaux de vie entre pays (O'Neill & al., 2012).

8. Scénario d'évolution socio-économique centré sur la compétition internationale, des politiques favorisant la production industrielle et peu de soucis de l'environnement, et défini par une faible croissance et une lente convergence des niveaux de vie entre pays (O'Neill & al., 2012).

précisément au niveau municipal) dans 12 pays du continent Américain.

Les résultats montrent que une augmentation unitaire de la température moyenne annuelle d'une municipalité entraîne une baisse de 1,2 points de % du revenu du travail dans cette zone (Dell & al., 2009).

Afin de mettre en avant l'effet de la température sur le revenu par habitant, Dell & al. (2009) utilisent un panel de 134 pays (identique à celui employé dans Dell & al. (2008)) dont ils étudient les performances économiques et les niveaux de température au cours de l'année 2000.

Leurs résultats estiment qu'en moyenne, un réchauffement de 1°C de la température moyenne annuelle diminue le revenu par habitant d'un pays de 8,5 points de % en moyenne. Ce résultat est la moyenne au niveau mondial, indifféremment du niveau de développement des pays. Mais comme précisé ci-dessus, cette réduction sera plus forte dans certaines régions du globe comparées à d'autres.

Selon cette étude, la variabilité des températures est même responsable à elle seule de 23% des différences de niveaux de revenus entre les pays en 2009, montrant son impact hétérogène à travers le monde. C'est ce qui est développé dans le reste de cette section.

3.2.1 Économies pauvres

En raison des hausses de températures, Burke & al. (2015), déjà présentés dans la section 2.1 à propos de la productivité, annoncent que la majorité des économies pauvres et en développement verront leur revenu moyen souffrir du réchauffement au cours du siècle. En effet, ils trouvent que le revenu moyen des pays parmi les 40% les plus pauvres de la planète actuellement sera diminué de 75% en moyenne d'ici la fin du siècle (dans le cas du scénario le plus pessimiste, c'est à dire le RCP8.5 combiné au SSP5, expliqués ci-dessus) par rapport à une évolution sans changement climatique.

Dans Dell & al. (2014), les auteurs rappellent que le résultat trouvé dans une précédente étude (i.e. Dell & al. (2012)) à propos de la croissance économique d'un pays (développée dans la prochaine section) reflète principalement la diminution du revenu par habitant causée par un réchauffement durable années après années. En effet, l'impact annoncé dans Dell & al. (2012) d'un accroissement unitaire de la température moyenne annuelle d'un pays est une baisse du revenu par habitant de 1,4 points de % de cette année (Dell & al., 2014). Ils trouvent cet effet uniquement dans les pays pauvres. Comme il sera développé plus tard

dans ce travail, Dell & al. (2012) remarquent que cet effet ne s'annule pas à la suite du choc de température, mais perdure les années suivantes. Ceci annonce donc que la température n'a pas simplement un effet sur le niveau de revenu, mais plutôt sur le taux de croissance de celui-ci (Dell & al., 2014).

3.2.2 Économies développées

Dans le but de représenter l'impact touchant les économies développées, l'exemple des effets observés aux États-Unis est une nouvelle fois utilisé. Je me baserai donc sur l'étude de Deryugina & Hsiang (2014), présentées dans la section concernant la productivité, qui cherchait à évaluer la relation entre les températures journalières et le revenu annuel aux USA.

De manière consistante avec les restes des études vues dans ce travail, la réponse du niveau de revenu est fortement négativement corrélée à l'augmentation des températures, et l'effet devient de plus en plus néfaste à mesure que la température moyenne quotidienne augmente. Aussi, la perte de revenu survient dans les secteurs étant exposés aux températures extérieures, conformément à la baisse de la productivité qui s'observe elle aussi uniquement dans ces secteurs.

Ainsi, à partir du seuil optimal qu'ils estiment entre 12 et 15°C, la baisse du revenu devient significative à partir de 18°C de moyenne journalière, provoquant une perte de \$7,46 en moyenne du revenu annuel par habitant de la zone exposée. Pour une moyenne entre 24 et 27°C, le perte moyenne annuelle s'élève à \$14,78 par personne. A partir de 27°C, celle-ci est de \$16,71, et au delà de 30°C de moyenne journalière, la perte moyenne est de \$20,56 du revenu annuel par habitant de la zone exposée aux chaleurs (Deryugina & Hsiang, 2014). Ces résultats sont tous statistiquement significatifs au seuil de 1%. Selon les auteurs, ce dernier résultat représente une baisse de 0,08% du revenu moyenne annuel par personne.

Toutefois, il faut noter que ces pertes moyennes sont majoritairement concentrées dans l'agriculture, où les revenus des travailleurs dépendent parfois directement du niveau de production de l'activité, comme les agriculteurs dont le revenu est basé sur le profit généré par leurs récoltes.

Dans les secteurs non-agricoles, où les employés ont généralement un revenu fixe pour leur travail, les pertes sont présentes bien que beaucoup plus faibles. Le résultat le plus statistiquement significatif (au seuil de 1%) est de -\$3,03 en moyenne pour une journée entre 24 et 27°C. En comparaison, le résultat avec ce niveau de température dans le secteur agricole est de -\$11,63 en moyenne (Deryugina & Hsiang, 2014).

Celui-ci représentant une faible part du PIB aux États-Unis (moins de 1% en 2017, comme

mentionné dans le premier chapitre) et n’occupant que peu de personnes (1,34% de l’emploi national en 2019⁹), les pertes sur le revenu moyen de la totalité de la population seront modérées. D’autant plus que l’impact sur les revenus du reste des secteurs se montre relativement faible.

Les conclusions des études ci-dessus montrent que le revenu annuel par habitant décroît en moyenne de un peu plus de 1% (Dell & al., 2009 ; Dell & al., 2014) avec un réchauffement marginal de la moyenne annuelle. Dans une économie développée comme les USA, il peut diminuer de plusieurs dollars pour une seule journée exposée à une température moyenne supérieure à 18°C (Deryugina & Hsiang, 2014). Ces pertes surviennent le plus souvent lors des saisons chaudes, et sont les plus importantes lors des vagues de chaleurs et dans les régions les plus chaudes du pays. Mais cet effet se concentre majoritairement sur les revenus des travailleurs des activités agricoles, n’impactant donc que très peu le revenu moyen de la population totale d’un pays développé.

En revanche, les pays pauvres dont l’agriculture occupe une grande part du PIB et emploie une large proportion de la population verront les revenus moyens de leurs habitants subir de lourdes pertes.

De manière générale, les études montrent que le revenu moyen mondial diminuera suite au réchauffement climatique. Les pays les plus marqués par cette réduction sont les pays actuellement pauvres, dont certains pouvant même être d’avantage appauvris à la fin du siècle (Burke & Hsiang, 2015).

9. Données de la banque mondiale : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SL.AGR.EMPL.ZS?locations=US>

3.2.3 Tableau récapitulatif des impacts sur le revenu par habitant

<i>Impact des températures sur le revenu</i>				
Étude	Catégorie de pays	Élément impacté	Impact observé	Variation de température
Burke & al. (2015)	Partout	Revenu moyen mondial	-23%	Entre +4,1 et +4,8°C en 2100 par rapport à 1900
		Revenu/habitant moyen	77% des pays plus pauvres par rapport à pas de réchauffement	
Dell & al. (2009)	Partout	Revenu/habitant au niveau municipal	-1,2 points de %	+1°C de la moyenne annuelle (seuil non précisé)
	Pays pauvre	Revenu/habitant au niveau national	-8,5 points de %	
Dell & al. (2012)	Pays pauvre	Revenu/habitant moyen annuel	-1,4 points de %	+1°C de la moyenne annuelle (seuil non précisé)
	Pays développé		Pas d'effet	
Deryugina & Hsiang (2014)	Pays développé (USA)	Revenu/habitant moyen annuel	-\$14,78 (moyenne nationale)	+1°C entre 24 et 27°C de moyenne journalière
			-\$11,63 (moyenne agricole)	
			-\$3,03 (moyenne non-agricole)	

3.3 Croissance

Dans les chapitres et sections précédents, il a été présenté comment l'augmentation des températures affecte les performances des différents secteurs économiques à travers le stock de capital dont ils disposent, via la variation de l'investissement, et leur productivité, que ce soit au niveau des rendements pour l'agriculture, ou de la productivité des travailleurs pour les activités non-agricoles. Ces variations de performances ont donc des impacts qui se répercutent sur le niveau de production des secteurs, et sur la production nationale dans certains cas.

Ces variations de productivité et de production d'une économie impactent alors le taux de croissance nationale des pays, montrant ainsi que l'élévation des températures se révèle être une des causes à l'origine d'un ralentissement de croissance qu'une nation peut traverser. Ceci est soutenu par Letta & Tol (2016) qui trouvent que les températures ont un effet sur la productivité des travailleurs, ayant elle même un effet sur la croissance de la PGF, qui à son tour a un effet sur la croissance économique nationale.

Conformément aux résultats expliqués précédemment, la non-linéarité de la relation entre économie et températures provoque des pertes de croissance plus importantes dans certaines régions du globe par rapport à d'autres, entraînant alors une croissance des inégalités internationales au niveau macroéconomique.

C'est ce qui est démontré dans cette section.

En effet, à l'instar de l'effet sur la production expliqué dans la section 3.1, la croissance connaît aussi le même impact avec les niveaux de températures autour du seuil optimal. Ainsi, un réchauffement à partir de températures initiales inférieures au seuil de 13-15°C entraîne une accélération de la croissance économique d'un pays. A l'inverse, la croissance se trouvera ralentie suite à un réchauffement à partir de températures supérieures au seuil optimal (Acevedo & al., 2018 ; Diffenbaugh & Burke, 2019).

Comme il a été montré précédemment dans ce travail, certains pays souffriront d'impacts du réchauffement bien plus sévères que d'autres, selon leur climat initial. Cela se traduit par des taux de croissance économique qui seront plus ou moins fortement ralentis selon le degré de chaleur qui caractérise le climat d'un pays, voir même des taux accélérés pour les régions les plus froides.

Cela annonce donc une croissance des inégalités, car les pays ayant un climat froid, inférieur à 13°C, sont majoritairement des pays déjà développés. Ceux-ci connaîtront des taux de croissances plus rapides en raison de l'augmentation marginale des températures dans leurs régions.

Au contraire, les pays chauds, comme mentionné plus tôt, sont généralement des pays pauvres ou en développement, et connaîtront des taux de croissance amoindris par le réchauffement de leurs régions. En favorisant les économies riches et défavorisant les autres, le réchauffement global aura pour effet d'augmenter les inégalités internationales au cours du XXIème siècle.

3.3.1 Pays pauvres

Les pays pauvres ayant des moyennes annuelles supérieures à la température optimale de 13-15°C, Acevedo & al. (2018) étudient le ralentissement de leur croissance lors de l'année du choc de température. Ils concluent qu'un réchauffement de 1°C de la température moyenne annuelle à partir d'une moyenne de 22°C ralentit la croissance nationale de 0,9 points de %. A partir d'une moyenne de 25°C, il est plus important et correspond à un ralentissement de 1,2 points de %. Ces impacts sont tous deux statistiquement significatifs au seuil de 1%. Ceci montre que au plus le climat d'un pays est chaud, au plus ce pays subira des effets de ralentissement de sa croissance économique. Les pays pauvres et chauds, souffrant déjà de cet impact à cause de leur climat initial, verront donc l'ampleur de ce ralentissement devenir plus important avec le réchauffement climatique dans les prochaines décennies. Ceci est la conséquence de l'éloignement de leur température moyenne annuelle du seuil optimal pour l'activité économique (Diffenbaugh & Burke, 2019).

Même si les pays affectés par cet impact néfaste sur la croissance ne représentent que 1/5 du PIB mondial (en 2016) selon Acevedo & al. (2018), ceux-ci regroupent tout de même près de 60% de la population mondiale en 2016. Dans ce sens, même s'il on peut considérer que le ralentissement de croissance ne touche pas la majorité de la richesse globale, il touche cependant plus de la moitié de l'humanité et est donc particulièrement préoccupant.

Des dégradations de taux de croissance de même amplitude sont également trouvées par Dell & al. (2008), qui cherchent à estimer l'impact des températures et précipitations sur les performances économiques au niveau national. Pour ce faire, ils étudient un échantillon regroupant 136 pays du monde entre 1950 et 2003.

Ils estiment qu'une augmentation de 1°C de la température moyenne d'une année diminue le taux de croissance de cette même année en moyenne de 1,1 points de % dans les pays pauvres (statistiquement significatif à 5%). Ils observent des effets semblables à 10 et 15 ans après le choc de température, montrant que ce dernier provoque des impacts sur le taux de croissance de l'économie, et non juste sur le niveau de performance de l'année du choc.

Afin de renforcer ces résultats, ils étudient à nouveau cette relation entre température et croissance quelques années plus tard et parviennent à une conclusion très similaire. Ce nouveau résultat montre que l'effet contemporain d'une augmentation marginale de la température moyenne annuelle ralentit la croissance de 1,39 points de % en moyenne dans les pays pauvres (statistiquement significatif à 1%) (Dell & al., 2012). Ils observent également que la baisse de performance est durable et agit sur le taux de croissance national, non pas uniquement sur le niveau de production contemporain.

3.3.2 Économies développées

De manière générale, les pays développés étant installés à des latitudes plus hautes que les pays pauvres, et ayant des climats plus frais, vont subir moins d'impacts néfastes dus à la montée des températures.

Comme il est argumenté par Acevedo & al. (2018) et Diffenbaugh & Burke (2019), les pays caractérisés par des moyennes annuelles sous le seuil de 13-15°C peuvent connaître des améliorations de leur performances économiques et de leur croissance grâce à un réchauffement marginal de leur climat.

En effet, le réchauffement climatique permet d'amener leur température moyenne annuelle à un niveau plus proche du seuil optimal pour les performances économiques, améliorant alors celles-ci (Diffenbaugh & Burke, 2019). Cette étude montre ainsi par l'exemple de la Norvège que la croissance des pays froids s'accélère avec la montée des températures, et qu'elle ralentit dans les pays chauds, comme en Inde (Diffenbaugh & Burke, 2019).

Même si les pays développés, situés dans des régions aux températures moyennes annuelles autour du seuil optimal, ne montrent pas d'effet négatif sur la croissance de leur économie, cela ne signifie pas qu'ils ne sont pas affectés par des chocs de températures.

Comme il a été vu dans les sections ci-avant, leurs secteurs subissent tout de même des pertes de performance et de production. Celles-ci sont masquées en regardant l'économie nationale dans son ensemble car ces pertes sont tantôt compensées par d'autres secteurs, tantôt trop faibles dans la part du PIB national car elles surviennent dans des secteurs n'ayant que peu de valeur ajoutée dans le PIB, comme le cas de l'agriculture aux États-Unis. Ainsi, même si sa croissance ne ralentit pas, une économie peut voir la part de ses secteurs dans son PIB changer en réaction aux gains et aux pertes de productivité que les secteurs peuvent rencontrer de façon hétérogène.

De plus, à mesure que le réchauffement se produit sur le long terme, la moyenne annuelle

des pays initialement sous le seuil de 13-15°C pourra potentiellement surpasser ce seuil dans beaucoup de pays développés. En conséquence, ceux-ci commenceront également à subir un ralentissement de leur croissance économique liés à d'avantages de degrés supplémentaires.

Cette section montre qu'une conséquence du réchauffement climatique sera un accroissement des inégalités macroéconomiques entre les pays développés et les pays pauvres et en développement.

En réalité, l'accroissement des températures moyennes depuis les 50 dernières années a déjà très probablement provoqué un ralentissement du rythme de la diminution des inégalités internationales, selon Diffenbaugh & Burke, 2019. En effet, ils découvrent avec une probabilité à 90% que les inégalités internationales seraient aujourd'hui plus faibles si le réchauffement n'avait pas déjà provoqué les effets d'accélération de croissance dans les pays froids et développés, et l'effet inverse dans les autres, comme étudié ci-dessus.

Ainsi, ils calculent que l'augmentation continue des températures moyennes de ces dernières décennies a provoqué une diminution considérable de la production nationale des pays pauvres et chauds, et une augmentation importante de la production nationale dans des pays froids et développés, en comparaison à un scénario sans évolution du climat (comme argumenté dans la section 3.1).

Tous ces effets depuis 50 ans résultent en une augmentation actuelle de près de 25% de inégalités pondérée par la population au niveau international (Diffenbaugh & Burke, 2019).

3.3.3 Tableau récapitulatif des impacts sur la croissance économique annuelle

<i>Impact des températures sur la croissance économique nationale</i>				
Étude	Catégorie de pays	Élément impacté	Impact observé	Variation de température
Acevedo & al. (2018)	Pays pauvre	Croissance annuelle	-0,9 points de % -1,2 points de %	+1°C à partir de 22°C de moyenne/an +1°C à partir de 25°C de moyenne/an
	Pays développé		Pas d'effet	+1°C à partir de 11°C de moyenne/an
Dell & al. (2008)	Pays pauvre	Croissance annuelle	-1,1 points de %	+1°C de la moyenne annuelle (seuil non précisé)
	Pays développé		Pas d'effet	
Dell & al. (2012)	Pays pauvre	Croissance annuelle	-1,39 points de %	+1°C de la moyenne annuelle (seuil non précisé)
	Pays développé		Pas d'effet	

Chapitre 4

Prévisions du modèle théorique

Dans la section 3.3, j'ai rassemblé les résultats de la littérature existante à propos de l'impact sur la croissance nationale suite à une hausse unitaire de la température moyenne annuelle d'un pays.

A présent, je vais estimer, à l'aide d'un modèle théorique, l'impact qui sera subi à la fin du siècle en raison du réchauffement climatique par rapport à une situation où le réchauffement mondial n'aurait pas eu lieu. Au vu des conclusions des travaux précédents qui n'annoncent pas d'effet négatif sur la croissance des pays riches, je concentrerai l'estimation de l'impact sur les pays pauvres et en développement.

4.1 La fonction de production

Considérons que la croissance nationale annuelle d'une économie est strictement déterminée par son niveau de production de biens et services au cours d'une année. Alors, la variation positive de la quantité de production d'une année déterminée par rapport à une autre représente une croissance de l'économie au cours de cette période.

Prenons donc une fonction de production afin de déterminer le niveau de biens et services produits par une économie au cours d'une année. Dans ce travail, je vais utiliser la fonction de production néo-classique de Cobb-Douglas :

$$Y(K, L) = AK^\alpha L^{1-\alpha}$$

où :

- Y représente la production totale de l'économie

- A représente la productivité globale des facteurs (PGF) et est déterminée de manière exogène au modèle
- K représente le capital physique, tels que les bâtiments, machines, ordinateurs, et autres équipements utilisés dans le processus de production
- L représente le travail, ou capital humain
- α représente l'élasticité de la production par rapport aux facteurs de production et $\in (0,1)$. Il est généralement admis que sa valeur est de 0,25, j'utiliserai donc celle-ci dans cette étude.

L'accumulation du capital physique K au cours du temps est déterminée par l'investissement et le taux de dépréciation du capital selon la fonction :

$$\Delta K = I - \delta K$$

où :

- ΔK est la variation de capital physique au cours du temps
- I représente l'investissement
- δ représente le taux de dépréciation du capital au cours du temps et $\in (0,1)$.

Dans ce travail, le capital humain L est considéré comme variant avec la productivité du travail. En effet, dans l'hypothèse où celle-ci diminue de 50% en raison de la chaleur, cela reviendrait à employer la moitié de la quantité de travail réellement utilisée dans la fonction de production.

En intégrant la relation entre capital humain et productivité du travail, ainsi que la fonction d'accumulation du capital physique, dans la fonction de production de l'économie, on obtient :

$$\Delta Y(K, L) = A(I - \delta K)^\alpha (pL)^{1-\alpha}$$

où :

- ΔY est la variation de production au cours du temps
- p est productivité du travail

A travers ce travail, il a été présenté que la production nationale d'une économie varie avec les niveaux de températures à laquelle elle est exposée. Les principaux canaux de transmission des effets de la chaleur jusqu'à l'activité économique sont la productivité du travail et l'investissement, ainsi qu'une accélération de la dépréciation du capital, et un effet

probable sur la PGF, d'après les études reprises dans les chapitres précédents. Cette fonction de production est donc choisie ici car elle est particulièrement adaptée au besoin d'estimation du réchauffement sur la croissance économique. En effet, elle reprend tous les éléments cités ci-dessus et permet donc d'évaluer leurs effets combinés sur la production totale d'une économie.

4.2 Réchauffement envisagé

Les différentes études présentées dans ce travail ont estimé les impacts sur l'économie selon plusieurs scénarios d'évolution possible du climat. Dans cette section, seuls les 2 scénarios issus du 5ème rapport du GIEC seront utilisés.

En effet, publié en 2014, ce rapport vient présenter les RCP comme les nouveaux scénarios de réchauffement global, supplantant ceux présentés dans les rapports antérieurs. Ces scénarios couvrent un éventail plus larges d'évolutions probables, et apportent des estimations plus précises à ceux utilisés précédemment.

A titre de comparaison, le RCP 4.5 est semblable au scénario B1, tandis que le RCP 8.5 est semblable aux scénarios A2 et A1F1¹

Les valeurs moyennes de réchauffement utilisées dans ce modèle suivent donc ces 2 scénarios :

- RCP 4.5 : Réchauffement entre 2,3 à 2,9°C en 2100, avec une estimation moyenne de 2,6°C.
- RCP 8.5 : Réchauffement entre 4,1 à 4,8 °C en 2100, avec une estimation moyenne de 4,45°C.

4.3 Résultats

Afin d'estimer la diminution des variables de la fonction de production suite à l'accroissement des températures, je me concentre sur leur fluctuation moyenne estimée à travers les études de la littérature abordée dans ce travail.

Pour l'investissement, je reprends les valeurs trouvées par Acevedo & al. (2018) dans le cas des scénarios RCP 4.5 et 8.5, respectivement évaluées à -5% et - 11% en 2100.

1. GIEC, 2014 : *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

Pour la productivité du travail, je reprends l'estimation moyenne des résultats des différentes études, annonçant une baisse moyenne autour de 2% par degré supplémentaire.

Pour la croissance de la productivité globale des facteurs, étudiée seulement par Letta & Tol (2016), le ralentissement de croissance est estimé à 1,7 points de % par degré supplémentaire.

Ce travail admet que les relations empiriques observées restent identiques au cours du siècle, et rejette les hypothèses d'intensification des effets de la chaleur ou d'adaptation à celle-ci. Alors, il est possible d'effectuer un simple calcul pour estimer l'ampleur des réductions des variables de production en 2100 par rapport à la situation avant le réchauffement global (1850-1900), selon les 2 scénarios d'évolution climatique.

Ainsi, les effets attendus lors de la dernière année du siècle dans les pays pauvres sont :

RCP 4.5 :	RCP 8.5 :
A diminue de 4,6%	A diminue de 7,8%
I diminue de 5%	I diminue de 11%
p diminue de 5,2%	p diminue de 8,9%

En intégrant ces diminutions des facteurs de production dans la fonction de production néo-classique définie ci-dessus, on obtient les résultats suivants pour la production annuelle totale d'une économie pauvre :

Sous le scénario RCP 4.5 et en prenant l'estimation moyenne de $+2,6^{\circ}C$ entre 1900 et 2100, la production économique annuelle d'un pays pauvre sera en moyenne réduite de 9,5% en 2100 en raison du réchauffement climatique.

Sous le scénario RCP 8.5 et en prenant l'estimation moyenne de $+4,45^{\circ}C$ entre 1900 et 2100, la production économique annuelle d'un pays pauvre sera en moyenne réduite de 16,5% en 2100 en raison du réchauffement climatique.

Cette perte de production totale d'une économie pauvre au cours de l'année 2100 montre le ralentissement de sa croissance annuelle qu'elle subit cette année là.

4.4 Limites

Ces résultats présentent cependant plusieurs faiblesses.

Premièrement, en raison du haut degré d'incertitude quant aux réponses des facteurs de production à un réchauffement du climat. En effet, l'estimation de la croissance de la PGF n'est basée que sur une seule étude et ne permet donc pas d'avoir un avis critique et nuancé sur celle-ci via d'autres observations. De plus, la PGF varie d'un pays à l'autre, notamment via le niveau de technologie disponible dans le pays, et montre donc très probablement des réponses différentes parmi les pays impactés par le même réchauffement.

Il en va de même pour l'investissement, qui montrera une réponse plus ou moins forte selon les pays. Par exemple, l'aspect culturel d'une population peut déterminer son aversion au risque et influencer les comportements d'épargne et de consommation des ménages et des entreprises, influant donc sur l'investissement national. Celui-ci dépend aussi du gouvernement et de la stabilité politique d'un pays. Face au réchauffement à venir et à d'autres événements futurs, les priorités des gouvernements peuvent être très différentes, impactant donc l'investissement public. De plus, l'effet de la température sur l'investissement reste encore un sujet peu étudié, avec donc peu de résultats disponibles.

La fluctuation de la productivité du travail est aussi très variable à travers les pays, et aussi selon les secteurs d'activités (comme montré par Somanathan & al., 2015). Il est difficile de donner une évaluation moyenne précise pour un travailleur car ceux-ci peuvent supporter différemment la chaleur suivant les activités et les pays, et donc montrer des fluctuations très variées.

Deuxièmement, l'élasticité de la production par rapport aux facteurs de production (α) admet comme valeur 0,25 dans ce travail car celle-ci est généralement utilisée dans les estimations de la fonction Cobb-Douglas. Mais elle peut fortement varier d'une économie à une autre selon la part de capital physique utilisée pour la production par rapport au capital humain. Les pays très pauvres dont la production nationale est essentiellement issue de l'agriculture de subsistance vont utiliser intensivement le facteur travail et donc montrer une valeur de α plus petite, ayant alors une forte influence sur le résultat de la fonction de production. A l'inverse, les pays en développement utilisant de manière croissante le capital dans la la production nationale ont une valeur de α plus importante que les économies essentiellement agricoles. La valeur de l'élasticité, assumée identique dans tous les pays étudiés dans cette section, biaise donc potentiellement les résultats.

4.5 Effets supplémentaires

Les résultats ci-dessus sont potentiellement sous-estimés à cause de l'impact des effets supplémentaires du réchauffement climatique. En effet, en plus des conséquences directes de la chaleur, l'augmentation des températures engendre aussi d'autres phénomènes climatiques ayant eux aussi des répercussions sur les facteurs de production.

Premièrement, les niveaux de températures et la survenance de cyclones tropicaux et tempêtes sont corrélés, comme il a été observé au niveau des tropiques dans l'Atlantique depuis 1950 (Hsiang, 2010). Il est probable que le changement climatique provoque l'apparition de tempêtes plus violentes, de façon plus fréquente et dans différents endroits (Dell & al., 2014; Acevedo & al., 2018). Ces désastres naturels ont été étudiés par Hsiang & Jina (2013) qui découvrent que les cyclones provoquent des impacts négatifs sur les taux de croissance des économies touchées, et non pas uniquement des effets sur le niveau de performance économique.

De plus, ces catastrophes naturelles peuvent détruire les infrastructures existantes, notamment les bâtiments, tels que les bureaux, usines et commerces, ainsi que les voies de communication comme les routes, ponts et chemins de fer, ou encore les infrastructures comme les ports et aéroports. Cela affecte alors les capacités de production en détruisant les lieux d'activité économique, et les échanges commerciaux à l'intérieur et à l'extérieur d'une économie victime de ces conditions climatiques.

Du point de vue de la théorie économique, ces phénomènes provoquent une accélération de la dépréciation du capital physique. Le deuxième facteur de production de la fonction utilisée ci-dessus peut donc subir une baisse plus importante en raison de l'augmentation de la valeur de δ . Cet impact se répercutera plus ou moins fort sur la croissance économique d'un pays selon l'élasticité de sa production nationale par rapport au capital physique.

Deuxièmement, les conséquences du réchauffement peuvent faire fluctuer le dernier facteur de production de la fonction utilisée dans cette section en affectant de plusieurs façons le travail disponible dans une économie. En effet, l'accroissement des températures peut provoquer des migrations massives de populations, essentiellement rurales, à partir des régions touchées par les tempêtes, les inondations, la sécheresse, les pertes de cultures agricoles, etc. (Dell & al., 2014; OMM, 2018; OMM, 2019). Toutefois, les migrations de populations rurales font suite à l'augmentation des températures dans les économies en développement, mais très peu dans les pays pauvres en raison des trappes à pauvreté qui y agissent (Cattaneo & Peri, 2015). Dans le cas où les migrations sont observées vers un autre pays, le pays initial voit sa force de travail diminuer.

De plus, les catastrophes naturelles peuvent menacer la survie des populations de façon plus ou moins sévère selon les régions du globe. Les cyclones et tempêtes tropicales entraînent de grands nombres de décès de manière régulière dans les pays exposés, et cette fréquence s'intensifiera avec le changement climatique (Dell & al., 2014 ; Acevedo & al., 2018). Aussi, les vagues de fortes chaleurs surviendront beaucoup plus fréquemment et de façon plus intense qu'auparavant (OMM, 2018 ; OMM, 2019). Les canicules entraînent l'augmentation des taux de mortalité bien au dessus de la moyenne habituelle, non seulement pour les personnes âgées (Dell & al., 2014), mais aussi pour la population active entre 15 et 44 ans (OMM, 2019). Une nouvelle fois, l'économie d'un pays voit sa force de travail diminuer suite aux conséquences du réchauffement.

De même, les pertes de rendements agricoles suite aux chocs de températures et aux sécheresses plus fréquentes provoquent une augmentation de la faim et de la malnutrition dans les pays pauvres fortement dépendants de l'agriculture de subsistance, comme il est montré précédemment dans ce travail. L'insécurité alimentaire est particulièrement forte et augmente considérablement ces dernières années en Afrique subsaharienne (Ambrosi & Hallegatte, 2005 ; OMM, 2018), provoquant une fois encore une diminution de la force de travail des pays touchés par ces famines. Selon l'OMM (2019), l'Afrique subsaharienne comptait 23 millions de personnes sous-alimentées en plus en 2018 par rapport à 2015, et ces crises alimentaires ont été amplifiées par les conditions climatiques dans 26 des 33 pays concernés. Ces différents phénomènes qui résultent de l'augmentation des températures agissent sur le niveau et le taux de croissance de capital humain disponible dans un pays. Celui-ci voit sa valeur baisser dans la fonction de production utilisée ci-dessus, entraînant donc une diminution de la croissance économique des pays victimes de ces conséquences climatiques. Comme pour le capital physique, la sévérité de l'impact sur la croissance nationale dépend de la valeur de α dans l'économie étudiée.

Conclusion générale

Ce travail rassemble une partie de la littérature récente concernant les effets d'un accroissement des températures sur les performances économiques. Il présente une vue d'ensemble des résultats des études qui lui sont antérieures et montre les liens généraux qui unissent l'économie au climat.

Premièrement, nous pouvons remarquer que ces liens passent par plusieurs canaux de transmission qui affectent les facteurs de production. En effet, les niveaux de températures influencent de façon non-linéaire la productivité globale des facteurs, la productivité du travail, et l'investissement.

Deuxièmement, ces effets se propagent jusqu'à impacter la production nationale, les revenus, et la croissance économique d'un pays. Ces effets sont visibles à long terme, et une augmentation continue des températures au cours du siècle provoquera des diminutions croissantes et durables des taux de croissance des économies.

Toutefois, ce ralentissement de croissance économique nationale est seulement visible dans les économies pauvres et en développement, situées dans les régions chaudes du globe, et par conséquent d'avantage vulnérables aux élévations de températures. Les économies développées ne montrent pas de réponse négative de leur performances économiques globales suite à une augmentation de leur température moyenne. A l'inverse même, certains de ces pays situés dans les régions froides gagneront en productivité, augmenteront leur production nationale, et accéléreront leur croissance en raison du réchauffement de leur climat jusqu'à un niveau plus proche de la température optimale pour l'activité économique. Dans le cas d'un accroissement des températures durable et de forte envergure, le seuil optimal de 13°C de moyenne annuelle pourrait être dépassé, faisant apparaître des pertes de performances et diminuer leur taux de croissance, bien que moins fortement que dans les pays chauds.

Le ralentissement de croissance qui sera caractéristique des pays pauvres et chauds au cours du XXIème siècle se montre de plus en plus fort à mesure que les températures at-

teignent des niveaux plus élevés. Un réchauffement mondial non-mitigé peut donc fortement impacter leur croissance, sans provoquer d'effets d'aussi grande envergure sur les pays développés, entraînant donc un accroissement des inégalités macroéconomiques internationales.

Ce mémoire se concentre uniquement sur les conséquences directes des températures. De futures recherches peuvent étudier l'impact global du changement climatique sur l'économie via les effets des catastrophes météorologiques, des migrations, et des crises sanitaires et alimentaires, comme il est abordé rapidement dans la section "Effets supplémentaires". Aussi, les coûts économiques estimés de la perte de biodiversité, de la montée des eaux, de l'émergence de nouvelles maladies, etc. pourraient être intégrés dans des futures études.

Enfin, ce travail fait l'hypothèse que les économies ne s'adaptent pas à l'augmentation de leurs températures. Or, celles-ci pourraient développer des technologies capables de réduire l'impact de la chaleur sur les secteurs d'activités économiques. Cette possibilité pourrait également être étudiée dans de futures recherches.

Bibliographie

- ACEVEDO Sebastian, MRKAIC Mico, NOVTA Natalija, PUGACHEVA Evgenia & TOPALOVA Petia (2018) “The Effects of Weather Shocks on Economic Activity : What are the Channels of Impact?”, International Monetary Fund, working paper n°18/144.
- AMBROSI Philippe & HALLEGATTE Stephane (2005), “Changement climatique et enjeux de sécurité“, Centre international de recherches sur l’environnement et le développement, n°03-2006.
- BURKE Marshall & EMERICK Kyle (2016). "Adaptation to Climate Change : Evidence from US Agriculture." American Economic Journal : Economic Policy, vol. 8, 106-40
- BURKE Marshall, HSIANG Solomon M. & MIGUEL Edward (2015), “Global non-linear effect of temperature on economic production”, Nature 527, 235 – 239.
- CATTANEO Cristina & PERI Giovanni (2015) "The migration response to increasing temperatures" National Bureau of Economic Research, working paper n°21622.
- DELL Melissa, JONES Benjamin F. & OLKEN Benjamin A. (2012), « Temperature Shocks and Economic Growth : Evidence from the Last Half Century », American Economic Journal : Macroeconomics, vol. 4, n°3, 66 - 95.
- DELL Melissa, JONES Benjamin F. & OLKEN Benjamin A. (2014), “What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature” Journal of Economic Literature, vol. 52, n°3, 740 - 798.

- DELL Melissa, JONES Benjamin F., & OLKEN Benjamin A. (2008), “Climate Change and Economic Growth : Evidence from the Last Half Century”, National Bureau of Economic Research, working paper n°14132.
- DELL Melissa, JONES Benjamin F., & OLKEN Benjamin A. (2009), “Temperature and Income : Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates”, American Economic Review, vol. 99, n°2, 198 - 204.
- DERYUGINA Tatyana & HSIANG Solomon M. (2014), “Does the environment still matter? Daily temperature and income in the U.S.”, National Bureau of Economic Research, Working paper n°20750.
- DESCHENES Olivier & GREENSTONE Michael (2012), “The economic impacts of climate change : evidence from agricultural output and random fluctuations in weather : Reply”, American Economic Review, vol. 102, n°7, 3761 – 3773.
- DIFFENBAUGH Noah S. & BURKE Marshall (2019), “Global warming has increased global economic inequality”, PNAS, vol. 116, 9808-9813.
- FENG Shuaizhang, KRUEGER Alan B & OPPENHEIMER Michael (2010), “Linkages among climate change, crop yields and Mexico–US cross-border migration”, PNAS, vol. 107, 14257-14262.
- GIEC (2014) : ”Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat [Sous la direction de l’équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer] ”, GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- GIEC (2018) : ”Résumé à l’intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 , Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d’un réchauffement planétaire de 1,5 par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d’émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté ” [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy,

T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p.

- GRAFF ZIVIN Joshua & NEIDELL Matthew (2014), “Temperature and the Allocation of Time : Implications for Climate Change, Journal of Labour Economics, vol. 32, n°1, 1 – 26.
- HEAL Geoffrey & PARK Jisung (2013), “Feeling the heat : temperature, physiology the wealth of nations”, National Bureau of Economic Research, working paper n°19725.
- HSIANG Solomon M. & JINA Amir S. (2014), “The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth : Evidence from 6,700 cyclones“, National Bureau of Economic Research, working paper, n°20352.
- HSIANG Solomon M. & KOPP Robert E. (2018), “An Economist’s Guide to Climate Change Science”, Journal of Economic Perspectives, Vol. 32, n°4, 3 - 32.
- HSIANG Solomon M. (2010), “Temperatures and cyclones strongly associated with economic production in the Caribbean and Central America”, PNAS, vol. 107, n°35, 15367 - 15372.
- IPCC, 2013 : Annex II : “Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JONES Benjamin F. & OLKEN Benjamin A., 2010. "Climate Shocks and exports", American Economic Review, American Economic Association, vol. 100, 454-59.
- LEE Y.H., SHINDELL D.T., FALUVEGI G, & PINDER R.W. (2016) : “Potential impact of a US climate policy and air quality regulations on future air quality and climate change” . Atmos. Chem. Phys., vol. 16, 5323-5342.

- LETTA Marco & TOL Richard S.J. (2016) ; “Weather, climate and total factor productivity”, university of Sussex, Working Paper Series n°102-2016.
- NIEMELA Raimo, HANNULAB Mika, RAUTIOA Sari, REIJULAA Kari, & RAI-LIOC Jorma (2002), “The effect of air temperature on labour productivity in call centres—a case study”, *Energy and Buildings*, vol. 34, 759–764.
- O’NEILL B.C., KRIEGLER E., RIAHI K. & al. (2012) “A new scenario framework for climate change research : the concept of shared socioeconomic pathways”, *Climatic Change*, vol.122, 387–400.
- Organisation météorologique mondiale (2019), “ Déclaration de l’OMM sur l’état du climat mondial en 2018 “, OMM, n°1233.
- Organisation météorologique mondiale (2020), “Déclaration de l’OMM sur l’état du climat mondial en 2019 “, OMM, n°1248.
- SCHLENKER Wolfram & LOBELL David (2010), “Robust negative impacts of climate change on African agriculture”, *Environmental Research Letters*, vol.5, n°1.
- SCHLENKER Wolfram & ROBERTS Michael J (2006), “Nonlinear Effects of Weather on Corn Yields”, *Review of Agricultural Economics*, vol. 28, 391-398.
- SCHLENKER Wolfram & ROBERTS Michael J (2009), “Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change”, *PNAS*, vol. 106, n°37, 15594 – 15598.
- SEPPANEN Olli, FISK William & LEI Q.G. (2006), “Effect of Temperature on Task Performance in Office Environment “, Lawrence Berkeley National Laboratory, n°60946.
- SEPPANEN Olli, FISK William, & FAULKNER David (2003), “Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building”, Lawrence Berkeley National Laboratory, n°53191.

- SOMANATHAN E., SOMANATHAN Rohini, SUDARSHAN Anant & TAWARI Meenu (2015), “The Impact of Temperature on Productivity and Labor Supply :Evidence from Indian Manufacturing”, Indian Statistical Institute, discussion paper n°15-02.