

Novembre 2019

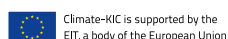
Comprendre les scénarios de transition

Huit étapes pour lire et interpréter ces scénarios

Aurore **Colin** | Charlotte **Vailles** | Romain **Hubert**

REMERCIEMENTS

Cette publication s'inscrit dans un projet financé par Climate KIC qui vise à faciliter l'utilisation de scénarios par les entreprises pour anticiper les risques et les opportunités liés à la transition vers une économie bas-carbone – en lien avec les recommandations de la TCFD.



Les auteurs remercient très sincèrement les experts qui ont pris le temps de relire cette publication pour leurs précieux retours :

Michel Cardona, Damien Demailly, Vivian Depoues, Marion Dupont, Gauthier Faure, Hadrien Hainaut, Maxime Ledez, Morgane Nicol, Alice Pauthier, Quentin Perrier, Sébastien Postic (I4CE)

Thomas Allen et Romain Svartzman (Banque de France), Romain Grandjean (The Shift Project), Aglaé Jézéquel (Laboratoire de Météorologie Dynamique, ENS), Florent Le Strat (EDF)



L'Institut de l'économie pour le climat (**I4CE** – Institute for climate economics) est une association experte de l'économie et de la finance dont la mission est de faire avancer l'action contre les changements climatiques. Grâce à ses recherches appliquées, l'Institut contribue au débat sur les politiques liées au climat.

Il rend aussi publiques des analyses pour appuyer la réflexion des institutions financières, des entreprises ou encore des territoires et les aider à intégrer concrètement les enjeux climatiques dans leurs activités. **I4CE** est une association d'intérêt général, à but non lucratif, fondée par la Caisse des Dépôts et l'Agence Française de Développement. www.i4ce.org

Résumé exécutif

La transition vers une économie bas-carbone implique des modifications profondes des systèmes socio-économiques. Son ampleur et sa nature exacte vont dépendre des actions que nos sociétés vont mettre en place pour gérer l'enjeu climatique, et ne peuvent pas être parfaitement connues à l'avance. Elle induit donc des **risques et opportunités pour les acteurs économiques**, que ceux-ci doivent anticiper pour construire au mieux leur stratégie face à un contexte d'incertitudes. Dans ce cadre, l'utilisation de scénarios – qui sont des **représentations plausibles de situations futures incertaines** – est très utile pour mieux comprendre les enjeux à moyen et long terme de la transition bas-carbone, et a notamment été recommandée par la TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures).

Avant d'utiliser des scénarios, il est essentiel de bien savoir les interpréter. Cela requiert d'une part de **se repérer dans l'écosystème complexe des scénarios liés au climat** et d'identifier ceux qui permettent d'explorer les questions liées à la transition bas-carbone – les scénarios de transition. Cela nécessite d'autre part de bien comprendre les enjeux de ces derniers.

Cette publication a donc pour objectifs :

- d'expliquer les **concepts-clefs autour des scénarios liés au climat**, de présenter les **grandes familles de scénarios** et les questions auxquelles ces scénarios permettent de répondre ;
- de donner des **clefs de lecture des scénarios de transition**, afin de **faciliter leur interprétation et éviter les contresens**.

Ne pas tout confondre : identifier les scénarios de transition parmi les scénarios liés au climat

Les scénarios liés au climat permettent d'explorer les interactions entre les systèmes socio-économiques et le changement climatique

L'usage de scénarios est particulièrement pertinent pour étudier un phénomène aussi complexe que le changement climatique et sur lequel il existe des connaissances scientifiques solides. Les scénarios liés au climat peuvent être définis selon trois grandes familles, chacune explorant une question différente relative aux interactions entre les systèmes socio-économiques et le climat :

- **Les scénarios de transition** : Quelles sont les évolutions possibles des systèmes socio-économiques qui permettraient de réduire suffisamment les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine pour limiter à 1,5°C ou 2°C la hausse globale des températures ?

- **Les scénarios de changement climatique** : Quelles sont les conséquences sur le système climatique de différentes trajectoires d'émissions de GES représentant elles-mêmes différentes trajectoires socio-économiques ?

- **Les scénarios d'impacts climatiques** : Quels sont les possibles futurs impacts directs et indirects du changement climatique sur les systèmes socio-économiques ?

Cette distinction en trois familles correspond à la très grande majorité des scénarios existant aujourd'hui et suit la structure des travaux des groupes de travail du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Il est évident que ces différentes questions et les enjeux qui en découlent sont en réalité étroitement liés et méritent aussi une analyse intégrée.

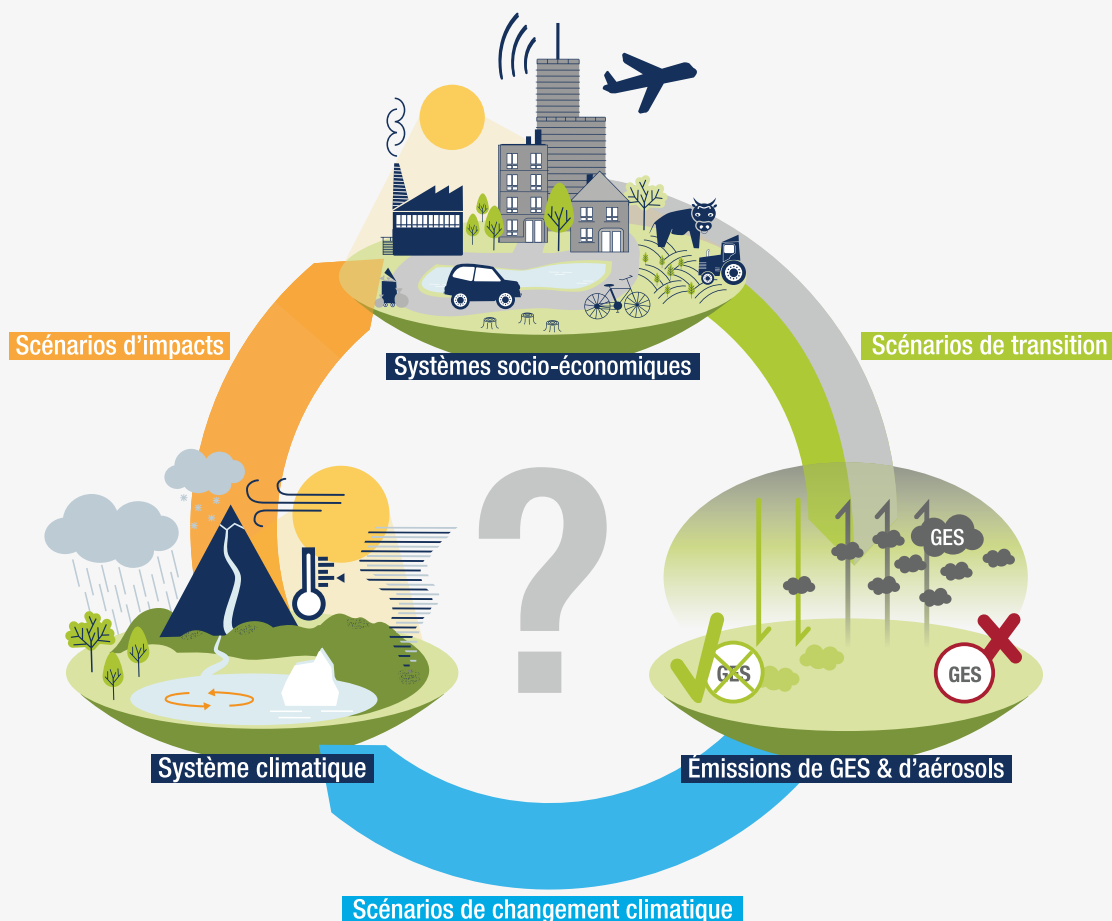
Les scénarios de transition

Les scénarios de transition explorent les différentes transitions bas-carbone possibles : ils décrivent des **évolutions des systèmes socio-économiques compatibles avec l'atteinte d'un objectif climatique** – qui correspond à la limite de la hausse globale des températures en deçà de 2°C ou 1,5°C. Différentes transitions bas-carbone sont envisageables et dépendent :

- de l'**objectif climatique** visé ;
- des évolutions du **contexte socio-économique** qui peuvent être plus ou moins favorables à la réduction des émissions de GES ;
- de l'**ampleur** et la **répartition des efforts de réduction dans le temps, par secteur** et par pays ;
- du **poids donné aux différentes solutions d'atténuation** déployées pour réduire ou séquestrer les émissions de GES ;
- du rôle des **différents leviers de changements** – politique, technologique et comportemental – permettant de déployer ces solutions.

Les scénarios de transition présentent des visions contrastées de la transition : ces scénarios répondent à des **objectifs différents**, et **reflètent la vision de leur constructeur**. La diversité des scénarios et des transitions bas-carbone qu'ils représentent découlent des **choix réalisés aux différentes étapes de construction du scénario**. L'utilisation d'un scénario en particulier implique l'adoption de sa vision de la transition et des hypothèses sur lesquelles il est basé, dont certaines ne sont pas forcément explicites. Bien interpréter les scénarios de transition nécessite donc de **s'intéresser aux différentes étapes de construction du scénario**, en particulier les hypothèses choisies en entrée et les caractéristiques du modèle utilisé pour construire le scénario.

FIGURE 1. LES INTERACTIONS ENTRE LE CLIMAT ET LES SYSTÈMES SOCIO-ÉCONOMIQUES EXPLORÉES PAR LES TROIS FAMILLES DE « SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT »



Source : I4CE, 2019

Les scénarios de changement climatique

Les scénarios de changement climatique – ou projections climatiques – explorent les possibles **conséquences des activités humaines sur le système climatique** selon différentes évolutions des systèmes socio-économiques. En effet, l'évolution du climat sur le long terme est conditionnée par **les émissions de GES actuelles et futures**, et donc par **l'évolution incertaine des systèmes socio-économiques**. Pour explorer ces incertitudes, les scénarios de changement climatique sont construits à partir d'hypothèses sur l'évolution de la concentration des GES dans l'atmosphère, les RCP, qui sont représentatifs de multiples trajectoires socio-économiques possibles. À partir d'un RCP choisi en entrée, un scénario de changement climatique décrit **l'évolution du système climatique et de ses variables telles que les**

températures, les vents, les précipitations, sur un horizon de temps et une zone géographique donnés.

Les scénarios d'impacts climatiques

Les scénarios d'impacts climatiques explorent les **conséquences possibles de l'évolution du climat sur un système donné** (par exemple l'environnement physique ; un écosystème ; un système humain tel qu'une ville, une exploitation agricole). Les impacts du changement climatique seront déterminés par les **modifications du climat** mais aussi par **l'évolution des systèmes socio-économiques**, qui va déterminer leur **degré d'exposition**, leur **sensibilité** et leur **capacité d'adaptation** au changement climatique. Un scénario d'impacts climatiques est construit à partir d'hypothèses sur : l'évolution du climat (grâce à un scénario de changement climatique), les caractéristiques actuelles

des systèmes socio-économiques et leurs évolutions, et les caractéristiques actuelles des systèmes physiques et naturels et leurs évolutions. De plus en plus de résultats de scénarios d'impacts – généralement sectoriels – sont disponibles publiquement sous des formes variées, et peuvent **alimenter une réflexion stratégique sur les impacts du changement climatique**.

Se repérer parmi les différents scénarios de transition

La diversité des scénarios de transition découle des choix réalisés aux différentes étapes de construction d'un scénario de transition, en particulier des hypothèses d'entrée et des caractéristiques du modèle utilisé pour construire le scénario. Ces choix influent sur l'interprétation qu'on peut avoir des résultats – il est donc essentiel de les identifier et de les comprendre.

Identifier et comprendre les hypothèses d'entrée du scénario

Un scénario de transition prend en compte des hypothèses sur les évolutions du contexte socio-économique (démographique, économique, politique etc.) qui peuvent être plus ou moins favorables à l'atteinte de l'objectif climatique. Ces évolutions peuvent être décrites dans un « **scénario de référence** », non contraint par le respect d'un objectif climatique. Le scénario de transition peut être construit en comparaison avec ce scénario de référence et ses résultats sont parfois présentés en différentiel par rapport à lui : identifier les hypothèses qu'intègre le scénario de référence est alors essentiel.

Les scénarios de transition sont contraints par l'atteinte d'un objectif climatique de 2°C ou 1,5°C, qui se traduit par une contrainte sur les émissions de GES. Des hypothèses spécifiques sont ainsi faites sur la manière d'atteindre l'objectif climat, portant notamment sur la **configuration internationale de l'action climatique**, les **solutions d'atténuation disponibles** et les **politiques, mesures et changements de comportement permettant la réduction des émissions de GES**. Notons que les hypothèses sur la disponibilité des technologies d'émissions négatives sont particulièrement importantes : des hypothèses favorables au développement de ces technologies permettent de différer l'action climatique dans le temps et modifient ainsi le rythme nécessaire de la réduction des émissions.

Identifier les principales caractéristiques du modèle

Les scénarios sont quantifiés grâce à des modèles qui comportent **une représentation de l'économie, du système énergétique et de l'utilisation des sols** (ou seulement un ou

deux de ces éléments, en se concentrant généralement sur un). Les modèles sont des **représentations simplifiées et partielles de la réalité**, et **selon la problématique à laquelle ils répondent, ils fonctionnent avec des approches différentes, n'ont pas le même périmètre et ne donnent pas les mêmes informations**. Identifier les principales caractéristiques du modèle est donc une étape importante pour la lecture d'un scénario. D'une part, les caractéristiques du modèle vont influencer les résultats-mêmes du scénario – en particulier l'approche analytique (macroéconomique/technico-économique), les fondements théoriques sur lesquels ils sont basés, la façon dont sont représentées les anticipations des acteurs. D'autre part, elles conditionnent les informations qui seront disponibles sur le scénario – et qui dépendent notamment du périmètre et de la granularité du modèle. Selon le modèle utilisé, un **même paramètre ne peut pas toujours être interprété de la même manière**. Par exemple, le prix du carbone peut représenter la mise en place de taxes ou marchés carbone ou bien représenter un prix fictif qui reflète l'effort de réduction des émissions imposé par le respect d'un certain objectif climatique.

Afin de créer un narratif cohérent autour de la transition, les résultats du modèle et les hypothèses du scénario sont mis en récit par le constructeur du scénario. Cet exercice permet notamment de donner de la crédibilité au scénario.

Les 8 étapes à suivre pour décrypter un scénario de transition

Une grille de lecture des scénarios de transition a été mise au point pour guider pas à pas le lecteur à travers un scénario. Elle synthétise les huit principales étapes à suivre pour interpréter un scénario de transition d'après les éléments d'explication qui ont été développés dans cette étude. Voici les différentes étapes et certains paramètres et informations associés (*qui ne sont qu'un aperçu de la grille développée dans cette étude*) :

1. Identifier le cadre dans lequel a été élaboré le scénario de transition

Informations/paramètres à identifier : l'organisation qui produit le scénario, le(s) but(s) recherché(s), les date et contexte de publication, la fréquence de la mise à jour du scénario, les grandes lignes de la transition décrite par le scénario.

2. Identifier le niveau d'informations disponibles sur le scénario

Informations/paramètres à identifier : le support de publication, l'existence d'annexes méthodologiques ou de tableaux de résultats, le périmètre (géographique, sectoriel, horizon temporel), la granularité des résultats (géographique, sectorielle, temporelle).

3. Comprendre dans quel contexte socio-économique a lieu la transition décrite par le scénario

Informations/paramètres à identifier : l'existence d'un scénario de référence et ses principales hypothèses, les hypothèses sur le contexte socio-économique (évolution de la croissance économique ou de ses déterminants, de la population, des modes de vie, du progrès technologique, du taux d'urbanisation, du taux d'inégalité, du degré de globalisation/de coopération internationale...).

4. Identifier l'objectif climatique et la répartition des efforts dans le temps

Informations/paramètres à identifier : l'objectif climatique visé, la probabilité qui lui est associée, la manière dont il est pris en compte par le scénario, l'évolution de la trajectoire des émissions de GES, les hypothèses faites/admises concernant l'évolution des émissions de GES en dehors de la période couverte par le scénario.

5. Identifier le poids donné aux différents leviers de la transition et les hypothèses associées

Informations/paramètres à identifier : les mesures / réglementations / politiques soutenant la mise en place des solutions d'atténuation, la valeur et la signification du prix carbone, les changements de comportement et les progrès technologiques nécessaires à la transition.

6. Analyser les répartitions géographique et sectorielle des efforts de réduction

Informations/paramètres à regarder : la trajectoire d'émissions de GES du scénario, l'évolution des émissions par secteur/zone géographique, les hypothèses concernant l'évolution des émissions dans les secteurs/zones géographiques non pris en compte par le scénario.

7. Identifier les solutions déployées pour réduire les émissions de GES et les technologies associées

Informations/paramètres à regarder : Exemples de paramètres permettant d'identifier les solutions déployées et leur poids relatif, par grande catégorie de solutions d'atténuation :

- **La maîtrise de la demande en énergie et en matériaux intensifs en émissions de GES :** la part de réduction des émissions due à l'efficacité énergétique en global et par secteur ; l'évolution de la consommation en énergie primaire ; l'évolution de la consommation en énergie des différents secteurs d'utilisation de l'énergie ;
- **La décarbonation du mix énergétique :** la part des différentes énergies renouvelables dans le mix énergétique, l'évolution de la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie, la part du nucléaire dans le mix électrique, le taux de déploiement des technologies de captage, stockage et utilisation du carbone (CCUS) ;
- **La maîtrise des émissions du système agricole :** l'évolution des émissions du secteur agricole, l'évolution de la consommation d'aliments carnés ;
- **Le recours aux émissions négatives :** le montant d'émissions négatives, les capacités de Bioénergie associée au captage et stockage de carbone (BECCS) mises en place, les puits forestiers mobilisés.

8. Identifier les conséquences macro-économiques de la transition

Informations/paramètres à regarder : L'évolution de la croissance économique et les impacts de la transition sur la croissance économique, les investissements nécessaires aux transformations décrites dans le scénario, les conséquences de la transition sur l'emploi, l'évolution des prix de l'électricité ou de l'énergie pour les consommateurs finaux.

A titre d'illustration, cette grille de lecture est appliquée à cinq scénarios : le scénario Sustainable Development (SDS) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le scénario Advanced Energy Revolution de Greenpeace, le scénario Low Energy Demand (LED) de l'Institut international d'analyse de systèmes appliqués (IIASA), le scénario Rapid Transition de British Petroleum (BP) et le scénario REmap de l'Agence Internationale de l'Energie Renouvelable (IRENA).

Conclusion

L'utilisation de scénarios est particulièrement pertinente pour évaluer les risques et les opportunités liés à la transition vers une économie bas-carbone et construire des stratégies robustes aux incertitudes. L'utilisation de scénarios de transition nécessite de **se repérer dans l'écosystème des scénarios liés au climat** – et notamment de les situer par rapport aux scénarios de changement climatique et aux scénarios d'impacts. Elle implique aussi d'être capable de bien interpréter ces scénarios et donc d'**identifier les choix réalisés lors de leur construction** – en particulier les hypothèses choisies en entrée et les caractéristiques du modèle utilisé. Cette publication à visée pédagogique s'inscrit dans un projet plus large portant sur **l'utilisation des scénarios par les acteurs économiques pour analyser les risques et les opportunités liés à la transition vers une économie bas-carbone**. Dans ce cadre, la mise au point d'un guide par étapes pour aider les entreprises à réaliser une analyse de risques et d'opportunités liés à la transition à partir de scénarios est en cours. Ce guide inclura également des recommandations sur les informations utiles à transmettre aux acteurs financiers sur la base de l'analyse de scénarios et des exemples de bonnes pratiques de reporting.

Table des matières

LISTE DES FIGURES, BOX, TABLEAUX	6		
LISTE DES ACRONYMES	7		
INTRODUCTION	8		
1. NE PAS TOUT CONFONDRE : IDENTIFIER LES SCÉNARIOS DE TRANSITION PARMIS LES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT	9		
1.1. Des scénarios pour explorer les interactions entre les systèmes socio-économiques et le changement climatique	9		
1.2. Les scénarios de transition	11		
1.2.1 De multiples transitions bas-carbone sont possibles	11	2.2.1 Les modèles se différencient selon deux « grands » types d'approches analytiques	33
1.2.2 Les scénarios de transition explorent les évolutions des systèmes socio-économiques compatibles avec l'atteinte d'un objectif climatique	15	2.2.2 Les principes théoriques et de fonctionnement, le périmètre et le niveau de détails du modèle influent sur les résultats du scénario	35
1.2.3 La grande diversité des scénarios de transition découle des choix réalisés lors de leur construction	16	2.3. Les résultats des scénarios : des informations qualitatives et quantitatives plus ou moins détaillées sur les transformations engendrées par la transition	38
1.3. Les scénarios de changement climatique	17	2.3.1 Les scénarios de transition fournissent des éléments quantitatifs sur l'évolution des systèmes socio-économiques	38
1.3.1 Les activités humaines perturbent le système climatique	17	2.3.2 Les résultats et les hypothèses des scénarios sont mis en récit pour créer un narratif cohérent autour de la transition	38
1.3.2 Les scénarios de changement climatique explorent l'incertitude sur l'évolution du climat liée aux activités humaines	19		
1.4. Les scénarios d'impacts climatiques	23	3. HUIT ÉTAPES POUR DÉCRYPTER LES SCÉNARIOS DE TRANSITION	39
1.4.1 Les impacts du changement climatique dépendent du climat et des choix socio-économiques	23	3.1. Grille de lecture des scénarios de transition	39
1.4.2 Les scénarios d'impacts climatiques étudient les conséquences d'un scénario de changement climatique sur un système donné	25	3.2. Une sélection de scénarios de transition passés à la loupe	42
1.4.3 Utiliser les résultats des scénarios d'impacts comme outils de décision pour des trajectoires résilientes et adaptées	26	CONCLUSION	54
		GLOSSAIRE ET LIENS UTILES	55
		BIBLIOGRAPHIE	59
2. SE REPÉRER PARMIS LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE TRANSITION	28		
2.1. Le narratif et les hypothèses du scénario : une vision contrastée des évolutions plausibles vers un monde bas-carbone	28		
2.1.1 Un scénario de transition prend en compte des hypothèses sur l'évolution du contexte socio-économique	28		
2.1.2 Les évolutions du contexte peuvent être explorées dans un scénario de référence associé au scénario de transition	31		
2.1.3 Un scénario de transition est contraint par le respect d'un objectif climatique	31		
2.1.4 Un scénario de transition présente une certaine vision de la transition bas-carbone	31		
2.2. L'utilisation de modèles aux propriétés différentes pour construire les scénarios de transition	32		

Liste des figures, box, tableaux

Figure 1	Les interactions entre le climat et les systèmes socio-économiques explorées par les trois familles de « scénarios liés au climat »	2, 10	Figure 18	Production d'électricité par source en 2040 selon différents scénarios de transition	53
Figure 2	Exemples de narratifs intégrant les enjeux de changement climatique et de transition, avec leurs risques associés	11	Figure 19	Part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie en 2040 selon différents scénarios de transition	53
Figure 3	Émissions globales de GES, par source et par type de gaz	12	Figure 20	Montant de CO ₂ capturé par CCUS en 2040 selon différents scénarios de transition	53
Figure 4	Les enjeux de la transition bas-carbone représentés par les scénarios de transition	14	Box 1	Les scénarios, de quoi parle-t-on ?	9
Figure 5	Processus de construction et éléments constitutifs d'un scénario de transition	16	Box 2	L'analyse intégrée des enjeux climatiques	11
Figure 6	L'influence de phénomènes naturels et d'origine humaine sur le système climatique explorée par les scénarios de changement climatique	18	Box 3	Principales sources d'émissions de GES	12
Figure 7	Processus de construction et éléments constitutifs d'un scénario de changement climatique	19	Box 4	Les technologies de captage, de stockage et d'utilisation du carbone (CCUS)	13
Figure 8	Le processus d'élaboration des scénarios liés au climat	21	Box 5	Les techniques d'émissions négatives (TEN)	15
Figure 9	Évolution temporelle du changement de la température hivernale à horizon 2100 suivant les RCP	22	Box 6	« Back-casting » ou « fore-casting » : deux logiques différentes de construction des scénarios	15
Figure 10	Les liens entre le système climatique et les systèmes socio-économiques explorés par les scénarios d'impacts	24	Box 7	Les RCP « Representative Concentration Pathways »	20
Figure 11	Processus de construction et éléments constitutifs d'un scénario d'impacts climatiques	25	Box 8	L'évolution du processus d'élaboration des scénarios liés au climat dans le monde de la recherche sur le changement climatique	21
Figure 12	Processus de construction et éléments constitutifs d'un scénario de transition	29	Box 9	Analyse d'une variable climatique tirée d'une projection climatique dans le 5 ^{ème} rapport d'évaluation du GIEC	22
Figure 13	Fonctionnement simplifié d'un modèle macro-économique	34	Box 10	Où trouver les résultats de scénarios de changement climatique pour la France ?	22
Figure 14	Fonctionnement simplifié d'un modèle technico-économique - exemple représentant le système énergétique global	35	Box 11	Exemples de projets et d'études mettant à disposition des données relatives aux scénarios d'impacts climatiques et à leurs résultats	27
Figure 15	Trajectoires d'émissions de CO ₂ liées à l'énergie et aux procédés industriels selon différents scénarios de transition	52	Box 12	Trajectoires socio-économiques : les SSP – “The Shared Socio-economic Pathways”	30
Figure 16	Émissions de CO ₂ liées à l'énergie par secteur en 2040 selon différents scénarios de transition	52	Box 13	Budget carbone	32
Figure 17	Énergie primaire par source en 2040 selon différents scénarios de transition	53	Box 14	Des clefs pour interpréter le prix du carbone dans les scénarios de transition	37
			Tableau 1	Les « Representative Concentration Pathways » à l'horizon 2100	20
			Tableau 2	Les SSP et leur narratif	30



Liste des acronymes

AIE	Agence internationale de l'énergie
AR5	Cinquième rapport d'évaluation du GIEC
BECCS	Bio-Energy Carbon Capture and Storage (Bioénergie associée au captage et stockage de carbone)
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage (captage, stockage et utilisation du carbone)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IAM	Integrated Assessment Model (Modèle d'évaluation intégrée)
IIASA	Institut international d'analyse de systèmes appliqués
IRENA	Agence internationale de l'énergie renouvelable
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD	Objectifs de développement durable
ONU	Organisation des Nations unies
PIB	Produit intérieur brut
PPA	Parité de pouvoir d'achat
RCP	Representative Concentration Pathway (Profil représentatif d'évolution de concentration)
SSP	Shared Socio-economic Pathways (Trajectoires socio-économiques communes)
TCFD	Task Force on Climate-related Financial Disclosures
TEN	Techniques d'émissions négatives
UE	Union Européenne
UTCATF	Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie
WEO	World Energy Outlook

Introduction

Au niveau international, une majorité de pays se sont engagés par l'Accord de Paris à maintenir l'augmentation de la température mondiale bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et à poursuivre les efforts en vue de limiter cette augmentation à 1,5°C. Le respect de cet objectif implique une diminution drastique de nos émissions de gaz à effet de serre (GES), et donc de profondes transformations sociales, politiques et économiques. L'ampleur et la nature exacte de cette transition vers une économie bas-carbone dépendront des actions que nos sociétés vont mettre en place, et ne peuvent donc pas être parfaitement connues à l'avance. Cette transition induit ainsi des risques et opportunités pour les acteurs économiques que ceux-ci doivent anticiper pour construire au mieux leur stratégie face à un contexte d'incertitudes. **Dans ce cadre, l'utilisation de scénarios – qui sont des représentations plausibles de situations futures incertaines – est très utile pour mieux comprendre les enjeux à moyen et long terme de la transition bas-carbone.** L'utilisation de scénarios à cette fin suscite de plus en plus d'intérêt, d'autant plus qu'elle a été récemment recommandée par la TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures¹), une initiative du Conseil de Stabilité Financière, dans un rapport paru en 2017. La TCFD recommande plus largement aux acteurs économiques d'utiliser des scénarios pour évaluer les risques et opportunités liés à la transition vers une économie bas-carbone mais aussi les risques liés au changement climatique.

Une récente étude d'I4CE² a montré que cette pratique est encore très peu répandue et a identifié des confusions dans la manière de comprendre et d'utiliser les scénarios liés au climat. L'écosystème des scénarios liés au climat est en effet complexe, et ce terme recouvre des objets de nature très différente. Certains scénarios explorent les évolutions futures possibles des systèmes socio-économiques qui

permettraient de respecter l'objectif de limiter à 1,5°C ou 2°C la hausse globale des températures, appelés dans cette étude « *scénarios de transition* ». D'autres décrivent les changements futurs possibles du climat dus notamment aux gaz à effet de serre (GES) émis par les activités humaines, appelés « *scénarios de changement climatique* », et certains se concentrent sur les impacts de ces changements climatiques sur les humains, désignés sous le terme de « *scénarios d'impacts climatiques* ».

Avant d'utiliser des scénarios pour évaluer des enjeux liés à la transition vers une économie bas-carbone, il est donc nécessaire d'une part de **se repérer parmi l'écosystème des scénarios liés au climat** et d'autre part d'être capable de **bien comprendre et interpréter les scénarios de transition**.

Cette étude a ainsi pour objectif d'aider à comprendre et à différencier les scénarios liés au climat et de proposer une analyse approfondie des scénarios de transition, afin d'éviter les interprétations erronées et de faciliter leur utilisation³. La première partie présente les grandes familles de scénarios liés au climat (scénarios de transition, scénarios de changement climatique, scénarios d'impacts). Des clefs de compréhension sont données sur ce que représente chaque famille de scénarios, les questions auxquelles ces scénarios permettent de répondre, la manière dont ils sont construits et les résultats types qu'ils permettent d'obtenir. La seconde partie analyse plus en détails les scénarios de transition, les éléments qui les composent et qui les différencient. À l'issue de cette seconde partie, une grille de lecture des scénarios de transition est proposée : elle synthétise les principales étapes à suivre pour lire et interpréter les scénarios de transition, ainsi que leurs principaux paramètres. Cette grille de lecture est appliquée à cinq scénarios publics.

1 <https://www.fsb-tcfd.org/>

2 <https://www.i4ce.org/download/tres-peu-dentreprises-ont-bon-usage-des-scenarios-pour-anticiper-un-futur-sous-contraintes-climatiques/>

3 Cette publication s'inscrit dans un projet financé par Climate KIC qui vise à faciliter l'utilisation de scénarios par les entreprises pour anticiper les risques et les opportunités liés à la transition vers une économie bas-carbone – en lien avec les recommandations de la TCFD.

1. Ne pas tout confondre : identifier les scénarios de transition parmi les scénarios liés au climat

1.1. Des scénarios pour explorer les interactions entre les systèmes socio-économiques et le changement climatique

BOX 1. LES SCÉNARIOS, DE QUOI PARLE-T-ON ?

Un scénario n'est ni une prévision, ni une projection

Un scénario peut être défini comme une représentation plausible d'un futur incertain, incluant parfois la trajectoire empruntée pour arriver à ce futur, construit à partir d'hypothèses et de paramètres moteurs cohérents entre eux. **Une telle représentation n'est ni une prévision ni une projection mais une description de ce que pourrait être une situation future sous certaines conditions.**

Un scénario est construit à partir d'hypothèses et parfois d'un modèle

Les scénarios explorent des **évolutions plausibles**, et sont construits à partir d'hypothèses pertinentes, vraisemblables et cohérentes (Godet et Durance, 2011). La construction des scénarios inclut parfois l'utilisation d'un modèle généralement quantitatif même si des modèles qualitatifs existent aussi. **Un modèle est une représentation abstraite et simplifiée de la réalité, ou d'une composante de la réalité, créée dans le but d'obtenir des informations que l'on n'a pas à partir d'informations que l'on a, ou d'hypothèses que l'on fait.** Il se compose d'un ensemble d'équations mathématiques fondées sur les sciences (physiques, économiques...) qui représentent les phénomènes économiques, physiques et naturels.

Un scénario est un outil pour explorer les incertitudes du futur

Les scénarios se sont développés comme des outils d'aide à la décision face à un contexte incertain. Ils permettent d'identifier, de comprendre et de structurer les incertitudes sur le futur – et d'aboutir à des choix et des décisions qui les prennent mieux en compte.

De nombreuses relations de causes à effets lient le développement socio-économique de nos sociétés et le changement climatique. L'état actuel des connaissances, évaluées de manière régulière par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)⁴, nous permet d'expliquer ces relations de la manière suivante : les activités humaines – et les systèmes socio-économiques⁵ de manière plus large – émettent des gaz à effet de serre (GES) qui provoquent l'augmentation de la concentration de ces gaz dans l'atmosphère. Cette concentration anormalement élevée dérègle le système climatique et modifie le climat⁶. Ces modifications impactent à leur tour les systèmes socio-économiques et altèrent leurs conditions de développement de multiples façons.

L'usage de scénarios est particulièrement pertinent pour étudier un phénomène aussi complexe que le changement climatique et sur lequel il existe des connaissances scientifiques solides – connaissances à partir desquelles les

scénarios sont construits. Leur usage permet notamment de mieux identifier et comprendre les incertitudes sur l'évolution du changement climatique, ses conséquences et la façon dont nos sociétés peuvent y faire face, que ce soit en termes d'atténuation des émissions de GES liées aux activités humaines ou d'adaptation aux effets du changement climatique.

Les scénarios liés au climat se sont ainsi développés comme des outils permettant d'éclairer les décisions que nos sociétés doivent prendre pour faire face à un enjeu d'une ampleur inédite. Trois familles de scénarios permettent d'explorer des questions différentes relatives aux interactions entre les systèmes socio-économiques et le climat :

- **Les scénarios de transition** : quelles sont les évolutions possibles des systèmes socio-économiques qui permettraient de réduire suffisamment les émissions de GES d'origine humaine pour limiter à 1,5°C ou 2°C la hausse globale des températures ?

⁴ Le GIEC est un organe scientifique créé en 1988 par l'Organisation des Nations Unies (ONU) pour aider la communauté mondiale à mieux comprendre le changement climatique et ses enjeux. Il est chargé de synthétiser et d'évaluer à intervalles réguliers les connaissances sur le changement climatique, ses causes et ses impacts. Il publie ses travaux sous forme de rapports d'évaluation (appelés « AR » pour « Assessment Report ») et de rapports spéciaux comme le rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement global de 1,5°C paru en 2018.

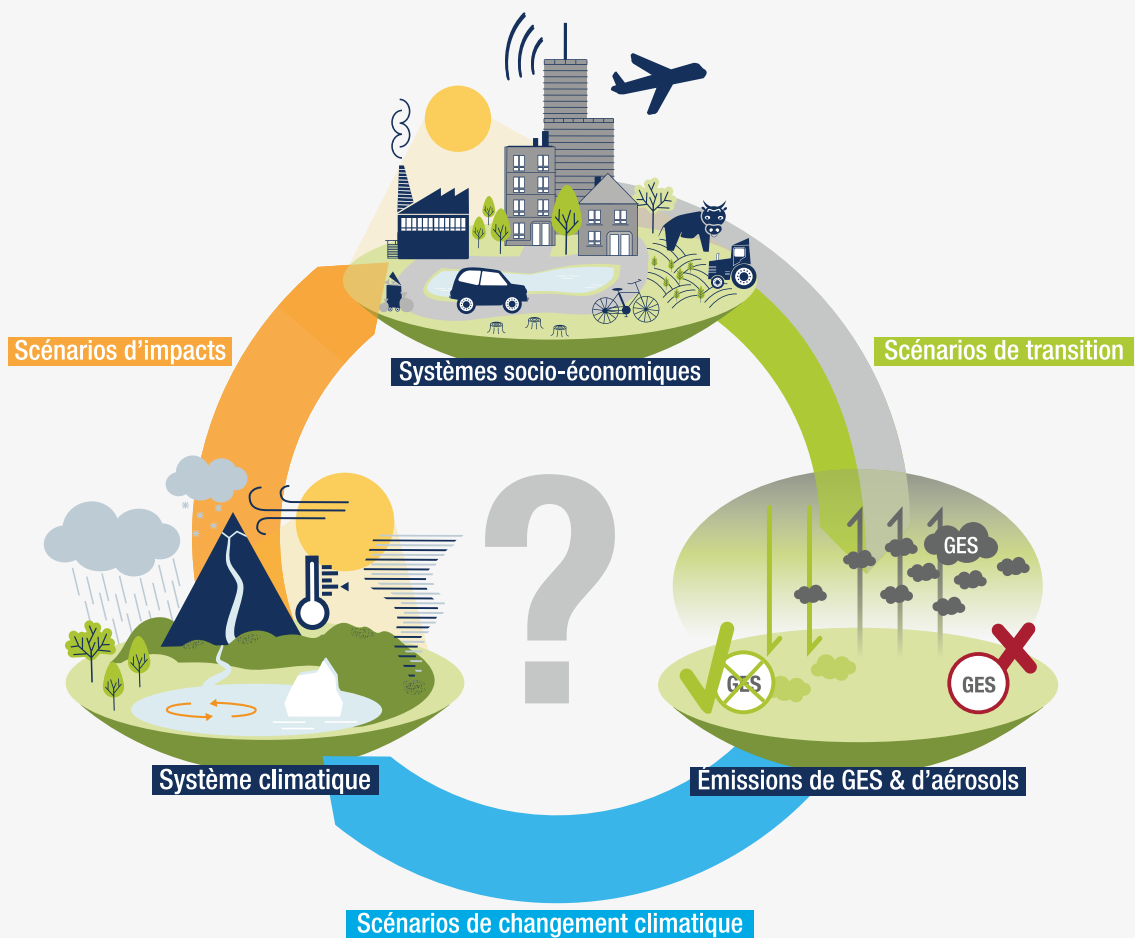
⁵ Un système socio-économique est un concept large qui décrit la façon dont est organisée une société. Il inclut un ensemble de caractéristiques démographiques, économiques, politiques, institutionnelles, sociales, culturelles et technologiques.

⁶ Les activités humaines perturbent le climat en majorité par l'émission de GES dans l'atmosphère, mais aussi par d'autres phénomènes expliqués de manière plus détaillée dans la Partie 1.3.

1. NE PAS TOUT CONFONDRE : IDENTIFIER LES SCÉNARIOS DE TRANSITION PARMI LES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT

- **Les scénarios de changement climatique** : quelles sont les conséquences sur le système climatique de différentes trajectoires d'émissions de GES représentant elles-mêmes différentes trajectoires socio-économiques ?
- **Les scénarios d'impacts climatiques** : quels sont les possibles futurs impacts directs et indirects du changement climatique sur les systèmes socio-économiques ?

FIGURE 1. LES INTERACTIONS ENTRE LE CLIMAT ET LES SYSTÈMES SOCIO-ÉCONOMIQUES EXPLORÉES PAR LES TROIS FAMILLES DE « SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT »



Source : I4CE, 2019

Du fait des relations de causes à effets entre systèmes socio-économiques, émissions de GES et impacts climatiques, et du fait des liens entre ces différentes familles de scénarios, les objectifs et résultats de celles-ci sont parfois confondus et les scénarios utilisés à mauvais escient. Les parties suivantes visent à clarifier ce que sont chacune de ces familles de scénarios.

⚠ Si cette distinction en trois familles correspond à la très grande majorité des scénarios existant aujourd'hui et suit la structure des travaux des groupes de travail du GIEC, il est évident que ces différentes questions et les enjeux qui en découlent sont étroitement liés. Ils commencent d'ailleurs à être décrits et analysés de manière intégrée, voire au sein de mêmes scénarios (cf Box 2).

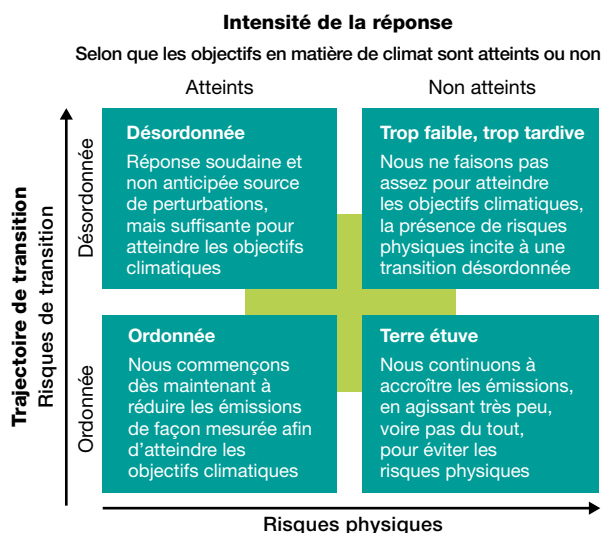
BOX 2. L'ANALYSE INTÉGRÉE DES ENJEUX CLIMATIQUES

Les acteurs économiques vont vivre conjointement la trajectoire de transition et les impacts du changement climatique. Ces deux phénomènes s'influencent l'un et l'autre, ce qui rend d'autant plus utiles les efforts pour représenter conjointement leur évolution. Comme illustré sur la **Figure 2**, l'absence de transition précoce pourrait par exemple mener à des impacts climatiques forts qui motiveraient une transition tardive et désordonnée. Dans ce cas les acteurs seraient exposés à un tableau particulier : des risques climatiques élevés et des risques liés à la transition également élevés.

Aussi, la mise en œuvre d'une trajectoire bas-carbone et résiliente aux changements climatiques – préconisée par l'Accord de Paris – nécessite d'identifier les interférences entre les actions entreprises pour la transition bas-carbone et celles entreprises pour s'adapter aux impacts du changement climatique. Par exemple, le développement de barrages hydroélectriques contribue à la transition, mais rend plus vulnérable à la raréfaction des ressources en eau.

Plus largement, le GIEC appelle aussi à scénariser des trajectoires socio-économiques durables, décrivant en même temps une trajectoire socio-économique bas-carbone et adaptée au changement climatique, et remplissant plus largement les 17 objectifs du développement durable (ODD) adoptés par l'ONU en 2015. Ces scénarios intégrés, encore émergents, portent le nom de « trajectoire de développement résiliente au climat » dans les rapports du GIEC. Leur construction mène à étudier comment les différentes actions représentées peuvent faciliter ou entraver la réalisation in fine de chacun des objectifs du développement durable.

FIGURE 2. EXEMPLES DE NARRATIFS INTÉGRANT LES ENJEUX DE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE TRANSITION, AVEC LEURS RISQUES ASSOCIÉS



Source : NGFS, 2019. A call for action, Climate change as a source of financial risk

1.2. Les scénarios de transition

1.2.1 De multiples transitions bas-carbone sont possibles

La transition bas-carbone cherche à limiter le réchauffement climatique à 2 °C et, si possible, 1,5°C

La transition bas-carbone correspond à l'évolution des systèmes socio-économiques de manière à ce que la trajectoire future des émissions de GES permette de limiter le réchauffement climatique en dessous d'une certaine limite. Cette limite a été clarifiée par l'Accord de Paris, adopté en 2015 lors de la COP21. Ratifié par 187 parties (dont l'Union européenne), il a fixé l'objectif de maintenir la température mondiale **bien en dessous de 2°C** par rapport aux niveaux préindustriels et de **poursuivre les efforts en vue de limiter cette augmentation à 1,5°C**.

Pour être compatible avec l'objectif climatique de 2°C ou moins, cette réduction doit permettre d'atteindre « **zéro émissions nettes** » au niveau mondial dans la deuxième moitié du siècle. Défini à l'article 4 de l'Accord de Paris, ce concept correspond à l'équilibre entre les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine et leurs absorptions par des « puits de carbone » (cf. **Box 5**). Désigné aussi par le terme de « neutralité carbone », il implique ainsi de ne pas émettre plus de GES que ce que les puits de carbone peuvent absorber⁷.

Comme l'illustre la **Figure 4**, l'atteinte de cet objectif nécessite le passage de nos sociétés actuelles, dont les activités et les modes de vie sont fortement émetteurs de GES (cf. **Box 3**), vers des sociétés bas-carbone, c'est-à-dire qui continuent de vivre et de se développer sans émettre, ou très peu, de GES.

⁷ Pour plus d'informations sur le concept « zéro émissions nettes », voir l'article « L'objectif « zéro émissions nettes » de l'Accord de Paris : signification et implications » (Perrier et al, 2018).

1. NE PAS TOUT CONFONDRE : IDENTIFIER LES SCÉNARIOS DE TRANSITION PARMI LES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT

BOX 3. PRINCIPALES SOURCES D'ÉMISSIONS DE GES

Les émissions de GES dues aux activités humaines proviennent :



De l'utilisation d'énergie, essentiellement de la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz) ou de biomasse*. Elle est la source principale des émissions de GES, notamment de dioxyde de carbone (CO_2).

Gaz émis : CO_2 , méthane (CH_4) et protoxyde d'azote (N_2O).



De l'agriculture – principalement de la fermentation entérique des élevages, de la fertilisation azotée des sols et de la riziculture.

Gaz émis : CH_4 , N_2O , CO_2 .



De certains procédés industriels – comme le procédé de décarbonatation dans l'industrie cimentière – et de l'usage de solvants.

Gaz émis : CO_2 , CH_4 , N_2O , gaz fluorés (HFC, PFC, SF_6).



Des déchets, qui émettent des GES lors de leur décomposition ou incinération.

Gaz émis : N_2O , CH_4 , CO_2 .

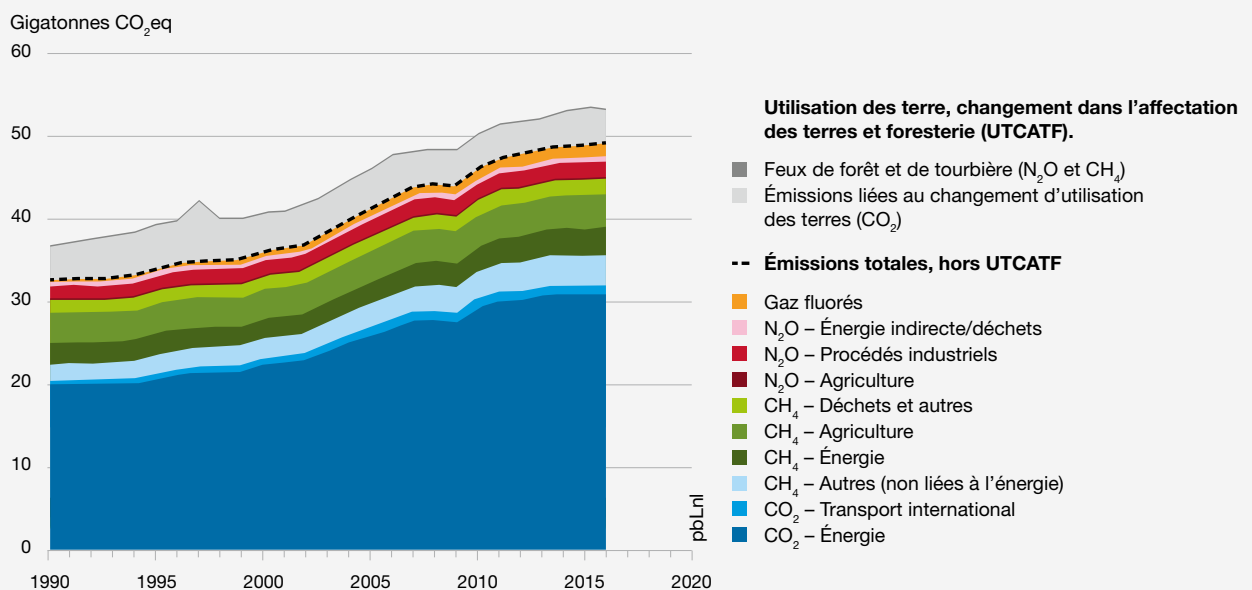


De l'utilisation des terres et des changements dans l'affectation des terres et des forêts (UTCATF). Les émissions liées à l'utilisation des sols et aux forêts peuvent être « négatives » dans certaines zones : cela signifie que ce secteur, notamment les forêts, absorbent plus de GES qu'il n'en émet. Les scientifiques qualifient ce phénomène de puits de carbone.

Gaz émis : CO_2 (en grande majorité), N_2O , CH_4 .

* La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (bois notamment) ou animale que l'on peut utiliser comme sources d'énergie.

FIGURE 3. ÉMISSIONS GLOBALES DE GES, PAR SOURCE ET PAR TYPE DE GAZ



Source : Olivier J.G.J. et al. (2017), Trends in global CO_2 and total greenhouse gas emissions : 2017 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague

Différentes évolutions du monde peuvent permettre de respecter un même objectif climatique

Différentes évolutions du monde pourront permettre le respect d'un **même objectif climatique**, qui peut être atteint par différentes trajectoires de réduction des émissions de GES. Ces différentes transitions bas-carbone envisageables vont dépendre des déterminants suivants :

- les **évolutions du contexte socio-économique** (représentées en bleu sur la Figure 4) : plus ou moins favorables aux réductions de GES, elles comprennent notamment les évolutions démographiques, économiques, politiques, technologiques, institutionnelles et des modes de vie qui ne découlent pas de la lutte contre le réchauffement climatique ;
- l'**ampleur** et la **répartition** des efforts de réduction dans le temps, par secteur et par pays ;
- les types de **solutions d'atténuation déployées** et leur importance pour réduire ou séquestrer les émissions de GES. D'après les travaux du GIEC, quatre grands types de solutions d'atténuation peuvent être identifiés (cf. Figure 4) :

- La maîtrise des émissions du système agricole et des sols ;
 - La décarbonation du mix énergétique à travers :
 - Le déploiement des énergies renouvelables ;
 - L'électrification des usages dans les secteurs du transport, de l'industrie et du bâtiment ;
 - Le déploiement du nucléaire ;
 - Le déploiement des technologies de captage, stockage et utilisation du carbone (CCUS) (cf. Box 4).
 - La décarbonation des carburants non électriques via le recours à l'hydrogène renouvelable, au biogaz...
 - La maîtrise de la demande en énergie et en matériaux intensifs en émissions de GES ;
 - Le recours aux émissions négatives qui permettent d'absorber le CO₂ de l'atmosphère (cf. Box 5).
- le rôle des différents **leviers de la transition** – politique, technologique et comportemental – permettant de déployer ces solutions.

BOX 4. LES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE, DE STOCKAGE ET D'UTILISATION DU CARBONE (CCUS)

Le captage, le stockage et l'utilisation du carbone, souvent désignés par leur acronyme anglais CCUS (Carbon Capture, Storage and Utilisation), sont des technologies permettant de réduire les émissions de GES du secteur de l'industrie et de l'énergie. Ces technologies capturent le CO₂ émis par des installations énergétiques (par exemples des centrales électriques à combustible fossile) et industrielles. Le CO₂ capturé est ensuite soit utilisé à des fins industrielles (par exemple, pour l'extraction du pétrole) ou pour la production d'autres biens (par exemple, des produits chimiques), soit stocké de manière permanente sous terre dans des formations géologiques profondes afin de l'isoler de l'atmosphère.

Le déploiement à grande échelle de cette technologie fait face à deux problématiques majeures. D'une part, il s'accompagne de certains risques – tels que la toxicité de certains solvants de captage, des fuites lors du transport, des fuites ou déplacements du CO₂ stocké sous terre – pouvant avoir des impacts potentiels sur la santé humaine et l'environnement*. D'autre part, son coût reste encore très élevé. Selon le GIEC, le déploiement à grande échelle du CCUS pourra difficilement se faire sans l'instauration de limites suffisamment strictes sur les émissions de GES ou de mesures qui imposeraient son utilisation (par exemple, sur de nouvelles installations) ni sans un soutien financier direct ou un prix du carbone suffisamment élevé permettant de rendre cette technologie compétitive.

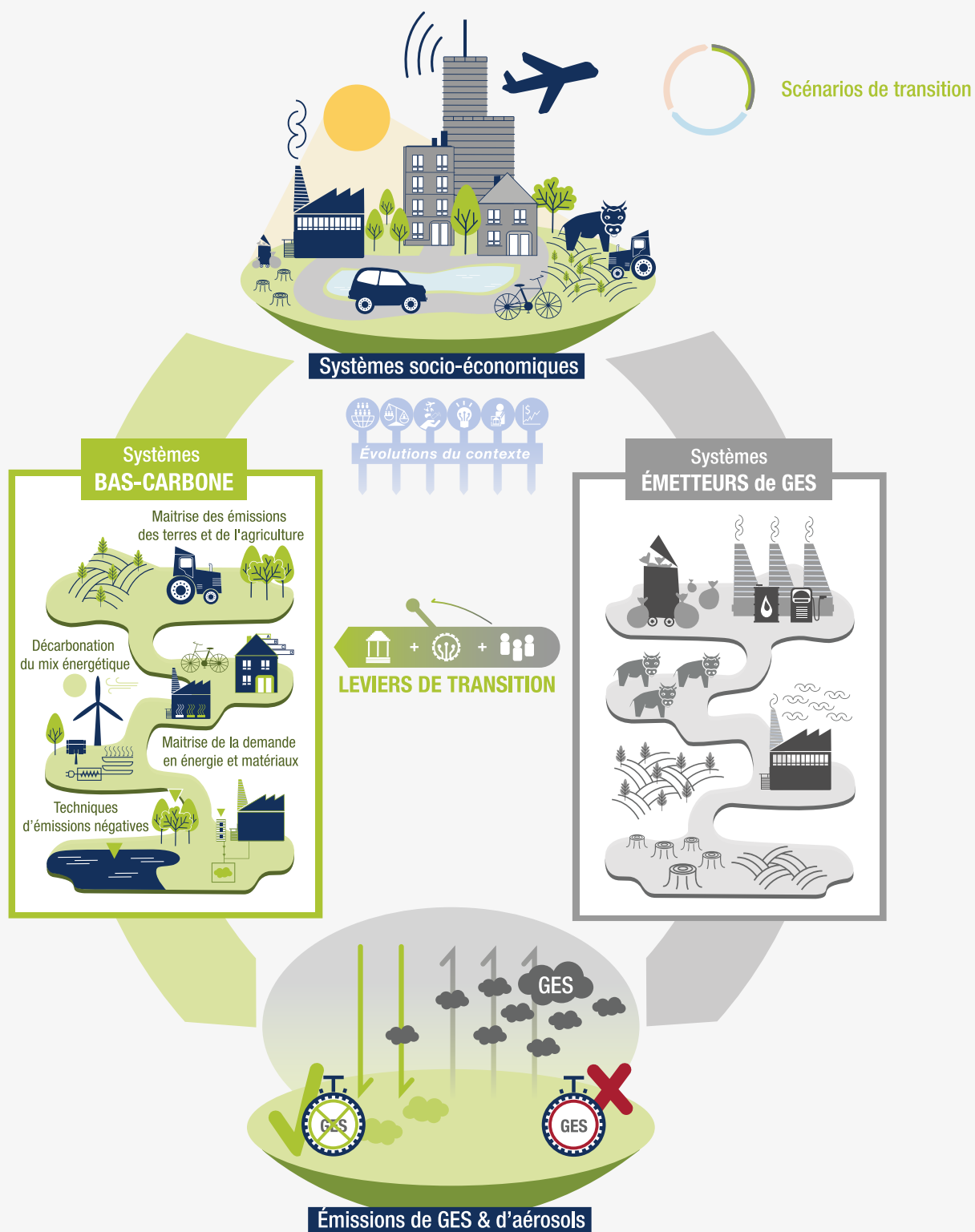
Dans son dernier rapport sur les conséquences d'un réchauffement climatique global de 1,5°, le GIEC précise qu'étant donné son rythme actuel de développement et le manque d'incitations concernant sa mise en œuvre, le déploiement futur du CCUS demeure incertain.

* Une importante littérature scientifique s'est développée ces dernières années concernant les différentes manières de minimiser les risques associés au déploiement du CCUS et d'assurer l'intégrité des puits de stockage, décrite par le GIEC dans le Chapitre 7.5.5. du Groupe III de l'AR5.

Sources : GIEC, Clarke et al. (2014), GIEC, Rogelj et al. (2018)

1. NE PAS TOUT CONFONDRE : IDENTIFIER LES SCÉNARIOS DE TRANSITION
PARMI LES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT

FIGURE 4. LES ENJEUX DE LA TRANSITION BAS-CARBONE REPRÉSENTÉS PAR LES SCÉNARIOS DE TRANSITION



BOX 5. LES TECHNIQUES D'ÉMISSIONS NÉGATIVES (TEN)

Les techniques d'émissions négatives (TEN) désignent un ensemble de techniques utilisées pour retirer du CO₂ de l'atmosphère. Elles peuvent être distinguées selon deux catégories :

- Les techniques qui permettent d'augmenter les puits de carbone naturels tels que la forêt via la reforestation et l'afforestation, les sols via l'augmentation de la séquestration du carbone dans les sols et les océans via des techniques de géo-ingénierie comme la fertilisation en fer des océans.
- Les techniques d'élimination artificielle du CO₂ dont la plus communément citée est la bioénergie couplée au captage et au stockage du carbone, souvent désignée par son acronyme anglais, BECCS (Bio-Energy Carbon Capture and Storage). Cette technologie consiste à produire de l'énergie à partir de centrales à biomasse, dont la culture a permis de capter du CO₂, puis de capter et de stocker dans le sol le CO₂ émis par la centrale.

De nombreux scénarios de transition ont recours à moyen et long terme aux émissions négatives, en particulier aux techniques de BECCS, pour atteindre leur objectif climatique. Plus les efforts d'atténuation sont lents et repoussés dans le temps, plus les scénarios de transition ont recours à ces techniques pour limiter le réchauffement global, notamment pour un objectif de 1,5°C.

La faisabilité technique de la majorité de ces techniques d'émissions négatives et leur déploiement à grande échelle sont encore très incertains. Le GIEC avertit ainsi que miser sur le déploiement massif de ces techniques dans le futur consiste à prendre un risque majeur concernant notre capacité à limiter le réchauffement à 1,5°C. De plus, de nombreuses incertitudes existent concernant les risques sociaux et environnementaux liés à ces techniques, en particulier aux techniques de BECCS qui, déployées à grande échelle, entrent en conflit avec l'utilisation des sols pour l'agriculture et avec la conservation de la biodiversité. Elles provoquent aussi une compétition avec l'usage de l'eau dans un monde plus chaud et plus peuplé.

Sources : GIEC, Clarke et al. (2014), GIEC, Rogelj et al. (2018)

1.2.2 Les scénarios de transition explorent les évolutions des systèmes socio-économiques compatibles avec l'atteinte d'un objectif climatique

Les scénarios de transition décrivent une trajectoire vers un futur possible dans lequel le développement socio-économique, et les émissions de GES qui en découlent, sont compatibles avec la limite du réchauffement climatique global en deçà de 2°C, voire 1,5°C, à la fin du siècle⁸. Contraints par le respect de cet objectif climatique, ils analysent les **transformations nécessaires à la transition vers des**

sociétés bas-carbone, les solutions d'atténuation à déployer et les leviers à mobiliser pour permettre ces transformations – qui correspondent aux enjeux de la transition représentés par la Figure 4.

La construction des scénarios de transition se fait donc selon une logique de back-casting (cf. Box 6) : ils partent d'un objectif climatique de 2°C ou moins, traduit par une limite sur les émissions mondiales de GES correspondant à cet objectif⁹, pour identifier les évolutions nécessaires permettant de respecter cet objectif.

BOX 6. « BACK-CASTING » OU « FORE-CASTING » : DEUX LOGIQUES DIFFÉRENTES DE CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS

Les scénarios construits selon une logique « back-casting » (ou analyse rétrospective normative) partent d'une situation finale prédéfinie, et retracent un chemin possible pour y aboutir. Ils permettent d'identifier les choix et les évolutions à opérer pour atteindre ce point d'arrivée.

Les scénarios construits selon une logique de « fore-casting » décrivent, à partir d'une situation présente et des tendances qui y prévalent, une suite d'événements conduisant d'une façon logique à un futur possible. Ils permettent d'obtenir une série de futurs alternatifs possibles selon le poids donné aux différentes tendances et hypothèses en entrée du scénario.

⁸ Les scénarios de transition, tels que définis dans cette étude, ne correspondent donc pas aux scénarios qui intègrent des politiques climatiques mais dont les efforts de réduction des émissions ne sont pas suffisants pour respecter l'objectif climatique défini par l'Accord de Paris, comme le scénario « New Policies » (NPS) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

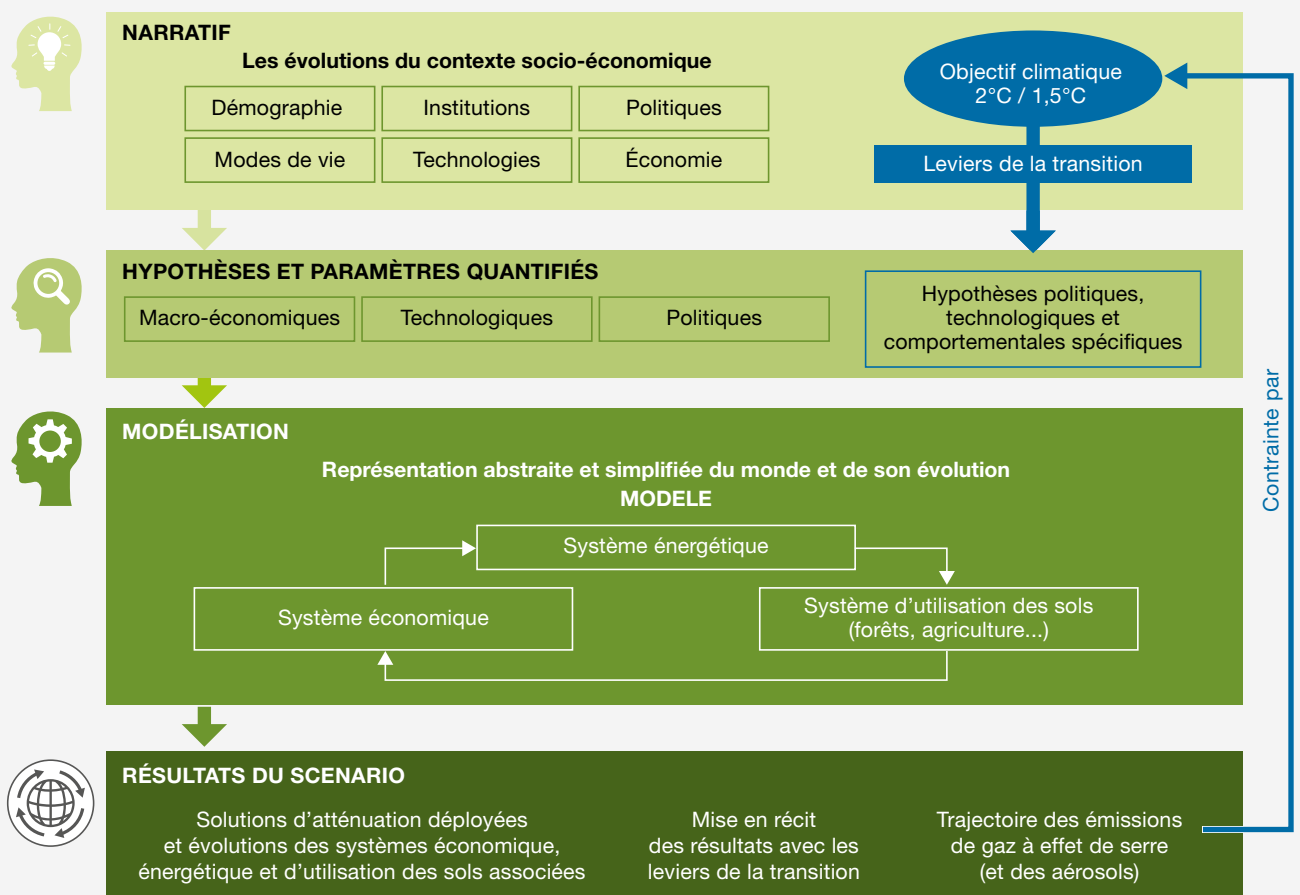
⁹ Cela implique que les scénarios non mondiaux, par exemple sectoriels ou nationaux, doivent inclure des hypothèses sur l'évolution des émissions des autres secteurs/pays.

1.2.3 La grande diversité des scénarios de transition découle des choix réalisés lors de leur construction

De même que de multiples transitions bas-carbone sont possibles, une multitude de scénarios de transition existent aujourd'hui. Ils traduisent **la vision de constructeurs** aux profils très divers : ce sont notamment des entreprises, des associations/ONG, des organisations internationales et des instituts de recherche. **Le ou les objectifs pour le(s) quel(s) sont construits les scénarios diffère(nt) aussi d'un scénario à l'autre** : certains ont pour but de démontrer la pertinence de solutions d'atténuation spécifiques, d'autres d'identifier une trajectoire de transition à moindre coût, d'informer la mise en place de stratégies climatiques au niveau d'une entreprise ou d'un Etat, ou encore de montrer que l'atteinte d'un objectif climatique a un impact positif sur l'économie, ou est compatible avec d'autres objectifs.

La diversité des scénarios et des transitions bas-carbone qu'ils décrivent découle des choix réalisés aux différentes étapes de construction du scénario, représentées par la Figure 5. La construction d'un scénario commence généralement par la mise au point d'un narratif qualitatif, décrivant une possible évolution du monde. Ce narratif est ensuite traduit en hypothèses et en paramètres quantifiés qui servent de valeurs d'entrée à des modèles représentant le fonctionnement du monde, de l'économie et des technologies. L'utilisation des modèles permet de décrire et de quantifier les évolutions futures, en particulier celles des systèmes énergétique et économique, qui sont nécessaires au respect d'un objectif climatique donné. Les résultats d'un scénario se composent ainsi de descriptions quantitatives et qualitatives sur les évolutions nécessaires à la transition bas-carbone, en particulier les solutions d'atténuations déployées. Ils incluent aussi la trajectoire d'émissions de GES associée au scénario. Ces

FIGURE 5. PROCESSUS DE CONSTRUCTION ET ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN SCÉNARIO DE TRANSITION



Source : I4CE, 2019

Note : Cette figure est une illustration stylisée et simplifiée du processus de construction des scénarios et des éléments qui le composent. En particulier, tous les modèles ne comportent pas une représentation de l'économie, de l'énergie, et des secteurs d'utilisation des sols.

résultats sont généralement mis en récit avec les leviers de la transition pour créer un narratif cohérent autour de la transition, et permettre au constructeur de scénario d'expliquer comment les solutions et les évolutions se mettent en place.

Le narratif, les hypothèses d'entrée et les propriétés du modèle retenu pour construire le scénario configurent ses résultats. L'utilisation d'un scénario nécessite donc d'identifier et de comprendre ces différents éléments et leur rôle dans la construction du scénario. Pour cela, la Partie 2 analyse plus en détails le processus de construction d'un scénario et les différents éléments qui le composent. Elle donne aux lecteurs les clefs nécessaires pour comprendre les scénarios de transition, les différencier et éviter les interprétations erronées. Elle est suivie d'une grille de lecture, qui synthétise les principales étapes à suivre pour lire et interpréter les scénarios de transition, appliquée à cinq scénarios publics.

1.3. Les scénarios de changement climatique

1.3.1 Les activités humaines perturbent le système climatique

Les activités de l'homme modifient le climat

De nombreuses activités humaines émettent des GES et provoquent ainsi l'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère. Cela augmente durablement le phénomène d'« effet de serre¹⁰ » qui signifie que davantage d'énergie solaire est piégée dans le système climatique¹¹. Cette énergie perturbe les dynamiques du système climatique et contribue notamment à réchauffer la surface de la Terre. Les activités humaines influencent aussi le climat par d'autres voies, par exemple via l'émission d'aérosols (particules fines) capables de modifier la formation des nuages et de réfléchir le rayonnement solaire, ou bien la modification de la couverture des sols et de leur capacité à réfléchir le rayonnement solaire (qu'on appelle « albédo »).

Les activités humaines perturbent ainsi de nombreuses variables climatiques, telles que la température de l'air et des océans, les précipitations, la vitesse et la direction du vent. Ces changements portent autant sur les conditions climatiques moyennes, comme les précipitations à l'échelle locale et globale, en matière de quantité d'eau totale, du nombre d'épisodes pluvieux, d'intensité, et de saisonnalité que sur les conditions climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur, en matière de fréquence, d'intensité, de durée et d'emprise géographique.

Des phénomènes naturels influencent aussi le climat

Le changement climatique est d'autant plus complexe que l'évolution du climat ne dépend pas seulement des activités humaines. Comme illustré sur la **Figure 6**, des phénomènes naturels externes au système climatique peuvent aussi modifier durablement le climat. Il s'agit typiquement du changement de la luminosité solaire, du volcanisme, de l'évolution de l'orbite terrestre.

Notons que même sans l'influence de phénomènes naturels externes au système climatique et des émissions de GES, les conditions climatiques fluctuent naturellement du fait d'une dynamique interne au système climatique. Les scientifiques appellent cela la variabilité interne du climat (représentée sur la **Figure 6** par les flèches orange à l'intérieur du système climatique). Cependant, contrairement au changement climatique provoqué par les émissions de GES, la variabilité interne n'affecte pas l'évolution à long terme du climat.

L'évolution du climat à long terme est conditionnée par les trajectoires socio-économiques actuelles et futures

Sur les 20 à 30 prochaines années¹², l'influence de l'homme sur le climat est déjà largement déterminée par les GES émis au cours du siècle dernier. Sur cette période, l'évolution des conditions climatiques est aussi largement influencée par les dynamiques naturelles propres au système climatique et sur lesquelles les humains n'ont pas d'emprise.

Sur le plus long terme, l'évolution du climat dépend fortement des émissions de GES actuelles et futures liées aux activités humaines. Ces trajectoires d'émissions étant conditionnées par de futurs choix socio-économiques incertains, il en résulte des incertitudes sur l'évolution du climat à long terme.

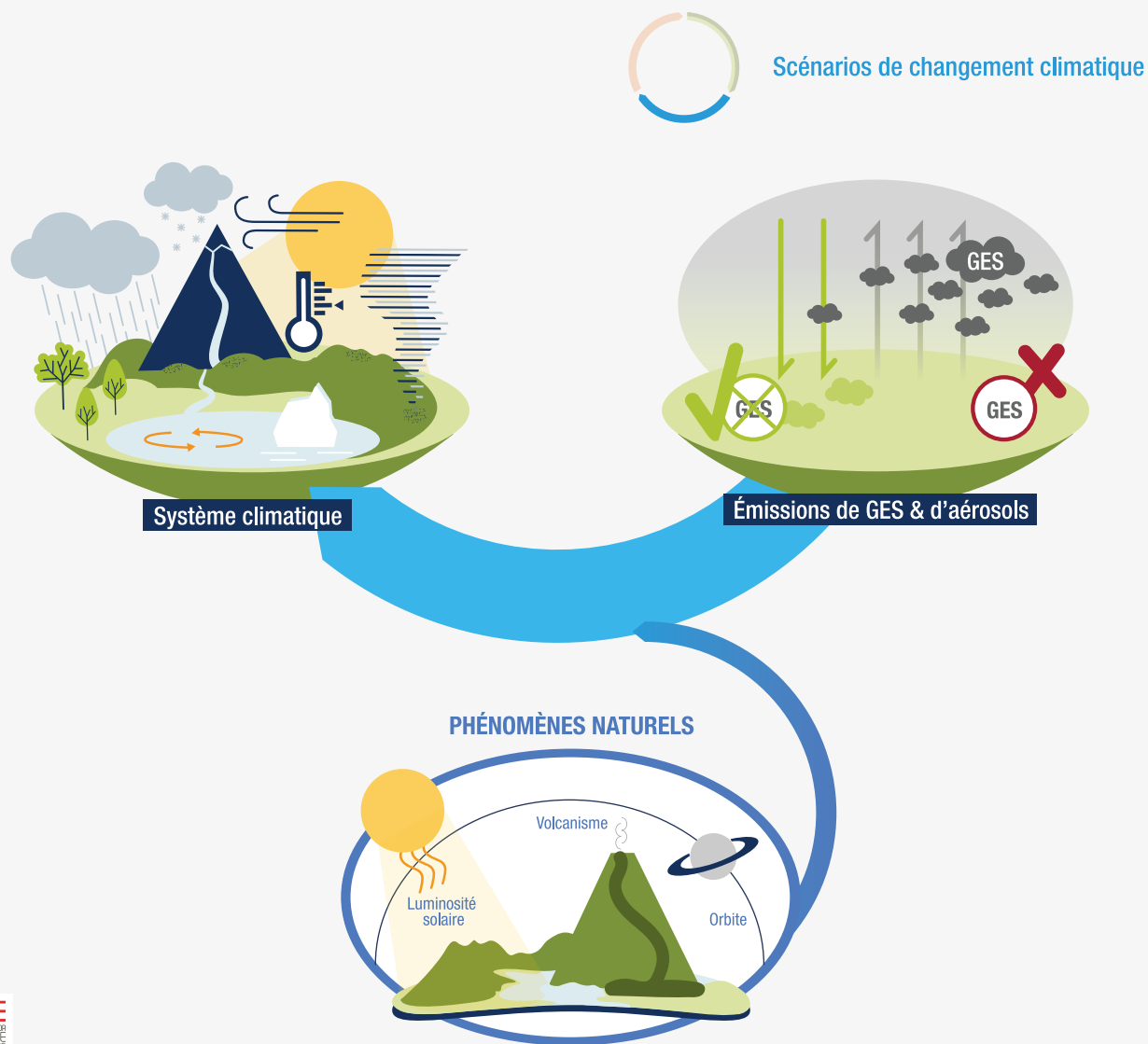
¹⁰ L'effet de serre évoqué ici est un effet d'origine humaine qui s'ajoute à l'effet de serre naturel, cf. Glossaire.

¹¹ Le système climatique est un système complexe constitué de cinq composantes principales en interaction : l'atmosphère, l'hydrosphère (océan, lacs, rivières...), la cryosphère (glaces terrestres, couverture neigeuse...), la biosphère, et la lithosphère (surfaces continentales).

¹² Cet horizon de temps ne fait pas l'unanimité parmi les climatologues – il est donné ici à titre indicatif.

1. NE PAS TOUT CONFONDRE : IDENTIFIER LES SCÉNARIOS DE TRANSITION
PARMI LES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT

**FIGURE 6. L'INFLUENCE DE PHÉNOMÈNES NATURELS ET D'ORIGINE HUMAINE SUR LE SYSTÈME CLIMATIQUE
EXPLORÉE PAR LES SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE**

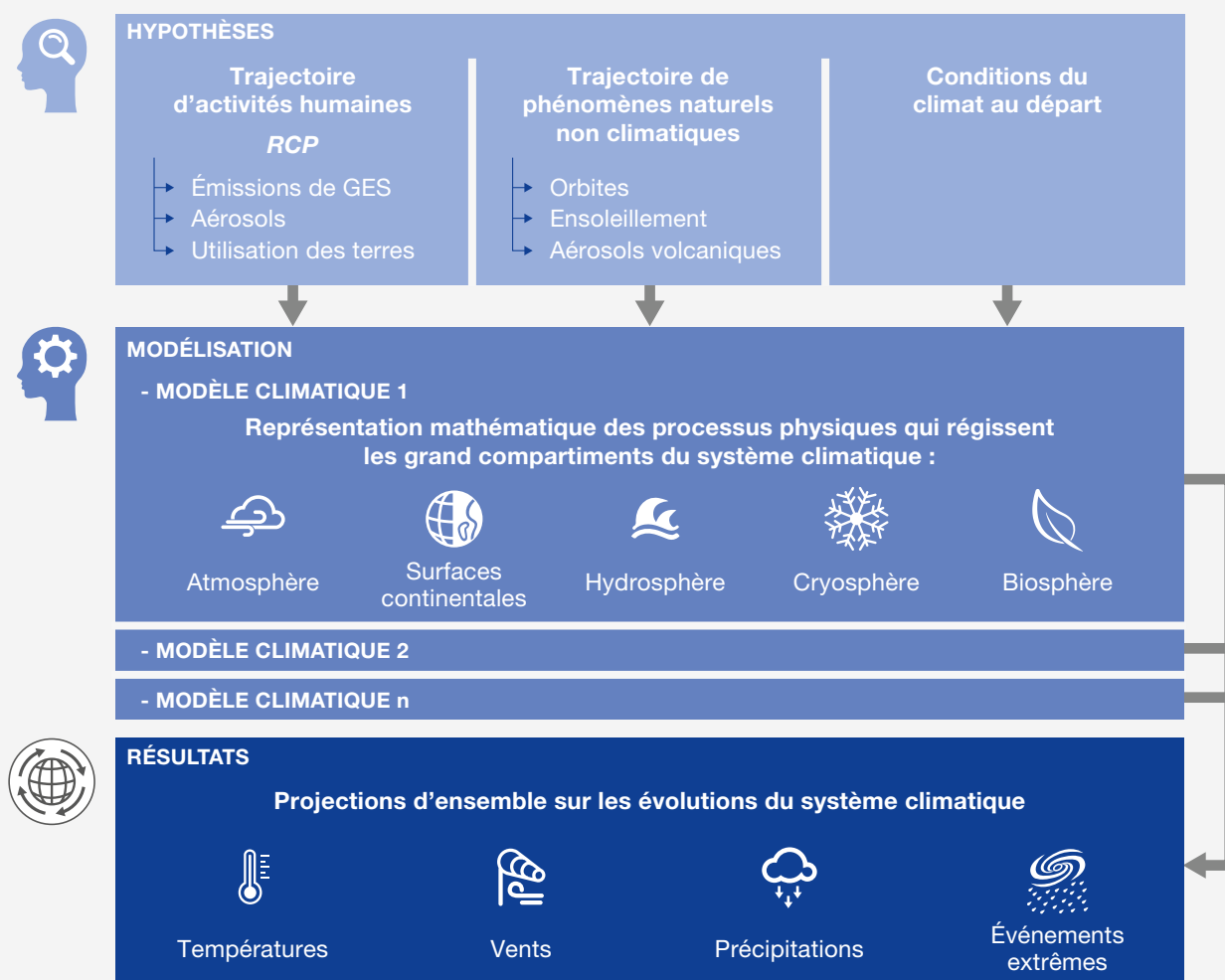


1.3.2 Les scénarios de changement climatique explorent l'incertitude sur l'évolution du climat liée aux activités humaines

Afin d'explorer les incertitudes sur l'évolution du climat liées aux activités humaines, les scientifiques réalisent des scénarios de changement climatique ou *projections climatiques* selon différentes trajectoires d'activités humaines.

Chaque scénario étudie l'évolution d'un large ensemble de variables décrivant le système climatique, sur un horizon de temps et une zone géographique donnés.

FIGURE 7. PROCESSUS DE CONSTRUCTION ET ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN SCÉNARIO DE CHANGEMENT CLIMATIQUE



Source : I4CE, 2019

Note : Les pictogrammes en résultats représentent l'évolution d'une sélection de composantes atmosphériques du système climatique. Les projections climatiques peuvent décrire de nombreux phénomènes, portant aussi sur d'autres composantes du système climatique (océans, glaciers etc.).

Un scénario de changement climatique part d'hypothèses quantifiées sur l'évolution future des concentrations de GES dans l'atmosphère : les RCP

Les scénarios de changement climatique sont construits à partir de différentes trajectoires d'évolution des concentrations de GES, d'aérosols et d'utilisation des terres, appelées RCP (*Representative Concentration Pathways*), qui représentent elles-mêmes différentes trajectoires d'activités humaines.

Afin d'organiser l'effort d'exploration des chercheurs, et rendre leurs travaux comparables, le GIEC et la communauté

scientifique ont établi cinq RCP. Comme expliqué dans la Box 7, chaque RCP fournit une trajectoire bien distincte, et ils forment à eux cinq un ensemble représentatif des multiples trajectoires de concentrations de GES existantes dans la recherche – et qui traduisent de multiples trajectoires de développement socio-économique.

Les RCP sont aujourd'hui utilisés comme données d'entrée des modèles climatiques, et le GIEC a pour ambition d'en faire un point de référence commun aux différentes communautés de recherche sur le changement climatique (cf. Box 8 pour plus de détails).

BOX 7. LES RCP « REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS »

Les RCP sont **des trajectoires d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre, des aérosols et des autres gaz chimiquement actifs dans l'atmosphère**. Ils ont été élaborés de manière à être représentatifs des trajectoires de concentrations et d'émissions des scénarios existants dans la littérature. Ils sont nommés selon le forçage radiatif qu'ils atteignent en 2100. Le forçage radiatif représente l'énergie piégée à la surface du globe en raison des substances à effet de serre : plus il est élevé, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. Les RCP se composent de séries de données sur les émissions, les concentrations, le forçage radiatif et l'utilisation des sols.

A l'origine au nombre de quatre, un cinquième RCP (le RCP 1.9) a été établi récemment dans le cadre du rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement climatique global de 1,5°C afin d'explorer les trajectoires d'émissions et de développement socio-économique limitant le réchauffement global à 1,5°C.

TABLEAU 1. LES « REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS » À L'HORIZON 2100

	Forçage radiatif	Concentration de GES (en CO ₂ eq)	Augmentation de la température globale	Evolution des concentrations en GES*
RCP 8.5	8,5 W.m ⁻²	1350 ppm	~ 4,3°C (3,2 – 5,4°C)	Augmentation continue et soutenue jusqu'en 2100
RCP 6	6 W.m ⁻²	850 ppm	~ 2,8°C (2,0 – 3,7°C)	Augmentation puis stabilisation à la fin du siècle
RCP 4.5	4,5 W.m ⁻²	650 ppm	~ 2,4°C (1,7 à 3,2°C)	Légère augmentation puis diminution à l'horizon 2050 et stabilisation à la fin du siècle
RCP 2.6	2,6 W.m ⁻²	450 ppm	~ 2°C (0,9 à 2,3°C)	Pic à l'horizon 2020 puis diminution constante
RCP 1.9	1,9 W.m ⁻²	< 450 ppm	~ 1,5°C	Diminution rapide et soutenue jusqu'à la fin du siècle

Source : IACE, 2019, d'après Vuuren et al. (2011) et GIEC (2018)

* Evolution variant selon l'ampleur du recours aux émissions négatives.

L'élaboration des RCP marque un virage méthodologique pour la communauté scientifique et la construction des scénarios liés au climat (cf. Box 8). Ils ont permis de gagner en rapidité et en coordination entre les différentes disciplines de la recherche sur le changement climatique. Ils ont aussi répondu au besoin de données plus détaillées pour les modèles climatiques.

Les modèles climatiques simulent le climat futur en tenant compte de l'influence des humains

Un modèle climatique est une représentation numérique du système climatique, de ses composantes et de leurs interactions. Il s'appuie en particulier sur les lois de la physique. Les modèles climatiques permettent ainsi de simuler l'évolution future du climat à partir des RCP utilisés comme hypothèses d'entrée.

Les modèles climatiques n'ont pas tous les mêmes caractéristiques (échelle géographique, type de phénomènes

climatiques représentés et leur niveau de détails etc.). Ainsi, tous les modèles climatiques ne sont pas adaptés aux mêmes usages. Par exemple, l'évolution des phénomènes climatiques sur de larges zones géographiques peut être étudiée par des modèles climatiques capables de représenter le globe. En revanche, la précision de ces modèles ne permet pas de décrire des phénomènes spécifiques à une échelle régionale, comme la circulation du mistral dans le sillon rhodanien. Ces phénomènes peuvent être étudiés avec des modèles régionaux, qui font appel à différentes méthodes de « descente d'échelle » (downscaling).

Afin d'optimiser la fiabilité d'une projection climatique, les scientifiques utilisent généralement plusieurs modèles qu'ils lancent plusieurs fois : cela permet de générer une projection consolidée fondée sur un « ensemble multi-modèles ».

Les scénarios de changement climatique décrivent l'évolution future de variables climatiques

Les scénarios de changement climatique décrivent l'évolution d'un large ensemble de variables climatiques selon une trajectoire donnée d'émissions et de concentrations des GES. Les résultats permettent d'analyser de manière isolée une variable climatique dans le temps (voir l'exemple dans la

Box 9) et/ou dans l'espace (à l'aide de cartes géographiques par exemple). Ces variables concernent notamment les températures, les vents et les précipitations. Elles peuvent aussi décrire d'autres composantes du système climatique comme les océans et les glaciers. Les évolutions des variables peuvent être exprimées par rapport à une période de référence ou en valeurs absolues. Ces résultats peuvent être disponibles à l'échelle mondiale ou à l'échelle d'une zone géographique plus restreinte comme un pays par exemple (cf. Box 10).

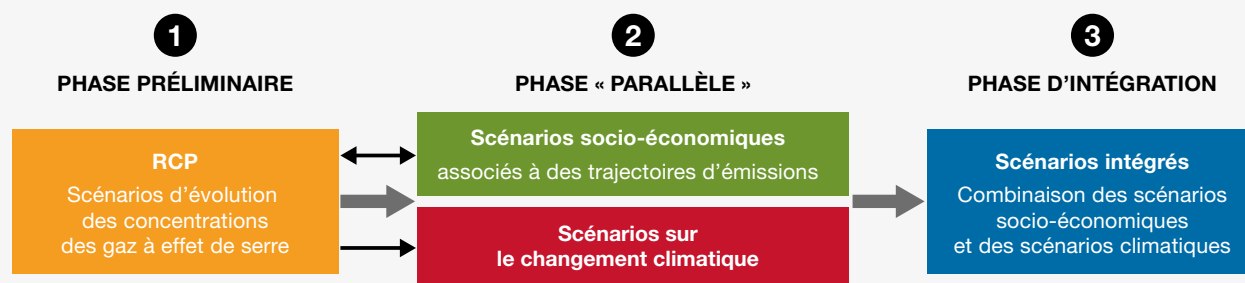
BOX 8. L'ÉVOLUTION DU PROCESSUS D'ÉLABORATION DES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT DANS LE MONDE DE LA RECHERCHE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les exercices de scénarisation de la recherche sur le changement climatique sont réalisés sous l'impulsion du GIEC. Le processus d'élaboration des scénarios précédant les RCP (cf. Box 7) se faisait de manière séquentielle et linéaire : des narratifs socio-économiques étaient définis puis traduits en trajectoires d'émissions de GES. Ensuite, ces trajectoires d'émissions étaient utilisées en entrée des modèles climatiques pour établir des projections des changements climatiques. Dans le cadre du dernier rapport d'évaluation (AR5) du GIEC, un nouveau processus « en parallèle » a été mis en place pour élaborer les scénarios.

Ce processus a commencé par l'élaboration de quatre RCP, qui ont été développés de manière à être représentatifs des trajectoires d'émissions des scénarios socio-économiques existants dans la littérature. Une fois élaborés, les RCP ont permis le travail « en parallèle » des chercheurs : d'un côté, les climatologues ont établi des scénarios de changement climatique à partir de modèles climatiques utilisant les RCP comme données d'entrée, de l'autre, les économistes ont développé des scénarios socio-économiques débouchant sur des scénarios d'émissions comparés aux RCP. La dernière étape de ce processus est en cours : elle consiste à combiner les scénarios socio-économiques et les scénarios climatiques pour analyser les différents aspects du changement climatique.

Chaque RCP n'est pas associé à un unique scénario socio-économique, mais peut résulter d'une multitude de combinaisons possibles d'hypothèses socio-économiques, technologiques et politiques. Les SSP ont été établis pour explorer ces combinaisons (cf. Box 12).

FIGURE 8. LE PROCESSUS D'ÉLABORATION DES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT

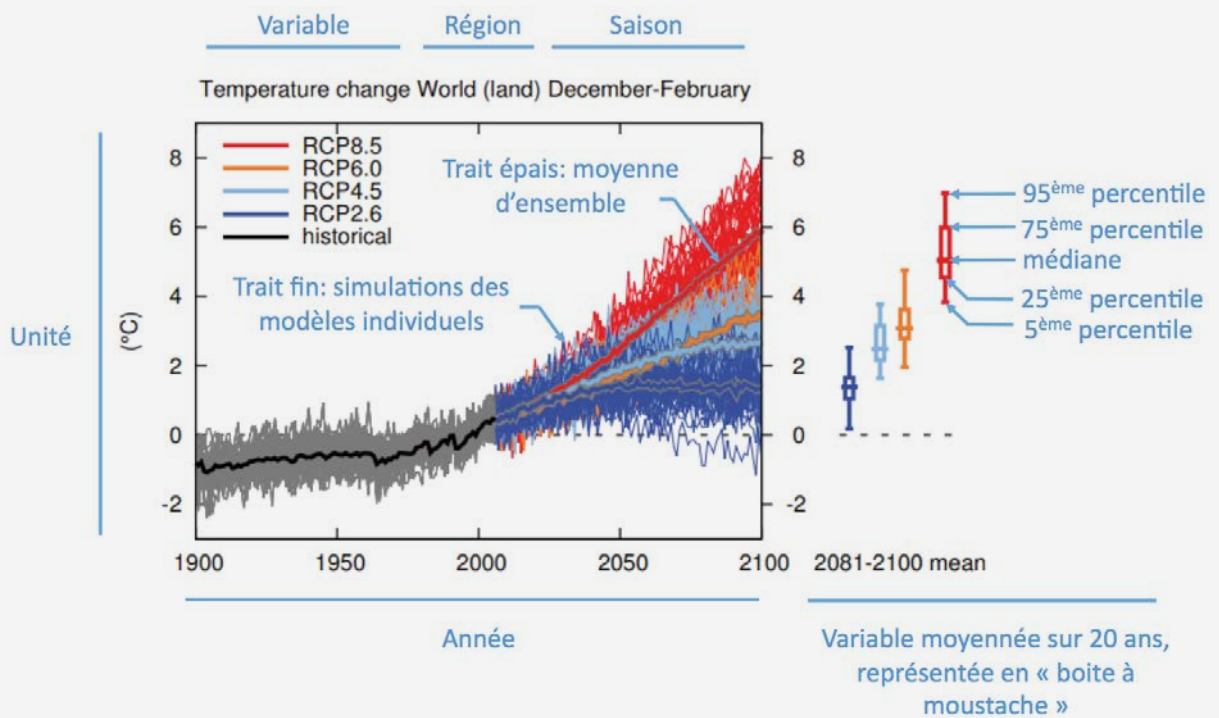


Source : I4CE, 2019, d'après Guivarch et Rozenberg (2013) et Moss (2010)

BOX 9. ANALYSE D'UNE VARIABLE CLIMATIQUE TIRÉE D'UNE PROJECTION CLIMATIQUE DANS LE 5^{ÈME} RAPPORT D'ÉVALUATION DU GIEC

La figure ci-dessous décrit l'évolution temporelle du changement de la température hivernale moyenne de l'air à la surface, à l'horizon 2100, par rapport à la période de référence 1986-2005. Elle est projetée pour différentes trajectoires d'évolution des concentrations de GES (les RCP).

FIGURE 9. ÉVOLUTION TEMPORELLE DU CHANGEMENT DE LA TEMPÉRATURE HIVERNALE À HORIZON 2100 SUIVANT LES RCP



Source : GIEC, 2013 : Annex I : Atlas of Global and Regional Climate Projections https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_AnnexI_FINAL-1.pdf

BOX 10. OÙ TROUVER LES RÉSULTATS DE SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LA FRANCE ?

En France, DRIAS met à disposition les résultats de scénarios de changement climatique – désignés par le terme de « projections climatiques » – via son portail en ligne.

Le visiteur du site peut choisir les caractéristiques de la projection climatique qu'il souhaite consulter, comme l'horizon temporel, la variable climatique analysée, le RCP d'entrée, le nombre de modèles utilisés (plusieurs ou un seul). Les résultats sont généralement présentés sous forme de cartographies.

Pour plus d'informations : Drias, les futurs du climat.

1.4. Les scénarios d'impacts climatiques

1.4.1 Les impacts du changement climatique dépendent du climat et des choix socio-économiques

Les modifications profondes du climat impactent les systèmes humains et leur environnement

Comme illustré par la **Figure 10**, le changement climatique modifie profondément les conditions climatiques qui peuvent impacter les systèmes humains.

Le changement climatique peut impacter les systèmes humains de façon directe. Par exemple, l'augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur impacte la santé humaine, ou encore les pluies diluviennes peuvent inonder des entrepôts.

Les impacts sur les systèmes humains sont aussi et surtout indirects. Les conséquences du changement climatique se transmettent sur les systèmes plus larges dont les humains dépendent. Le changement climatique impacte les systèmes physiques naturels¹³ : il entraîne par exemple l'augmentation du niveau de la mer, la modification des régimes des cours d'eau ou encore l'augmentation de la sécheresse des sols. Le changement climatique impacte aussi les écosystèmes animaux et végétaux, occasionnant des migrations, proliférations, diminutions voire extinctions d'espèces. Ces impacts sur les différents systèmes s'alimentent les uns les autres et se propagent en cascade, aboutissant à de multiples impacts sur les systèmes humains. Par exemple, l'augmentation des sécheresses peut diminuer les rendements des exploitations agricoles. Ou encore, le développement de zones humides peut mener à la prolifération de moustiques porteurs de maladies transmissibles aux humains.

De nombreux impacts du changement climatique sont déjà observables aujourd'hui sur la santé, les infrastructures, l'économie, la sécurité, l'alimentation et l'eau¹⁴. D'autres impacts – dits « potentiels » – sont susceptibles de se produire dans un futur plus ou moins proche.

Les caractéristiques des systèmes et leurs évolutions déterminent aussi les impacts

Les impacts climatiques ne dépendent pas seulement de l'évolution du système climatique. Ils dépendent aussi des caractéristiques des systèmes socio-économiques, et de leur évolution. Il s'agit notamment de leur degré d'exposition au changement climatique, de leur sensibilité (à quel point le fait d'être exposé à un changement climatique peut avoir des conséquences néfastes ou bénéfiques) et de leur capacité d'adaptation (à quel point le système est capable de gérer les conséquences d'un changement climatique) – ces trois caractéristiques sont représentées sous forme de pictogrammes sur la **Figure 10**.

La sensibilité et la capacité d'adaptation d'un système déterminent son degré de vulnérabilité face au changement climatique – qui varie selon les systèmes. Par exemple, une économie concentrée sur les activités agricoles aura des points de vulnérabilité différents d'une économie concentrée sur les activités industrielles : elles ne seront pas impactées de la même façon par une sécheresse, une canicule, etc.

Les sociétés ont la capacité de modifier leur exposition et leur vulnérabilité aux impacts climatiques, ainsi que celles des systèmes naturels, par certains choix de développement. Par exemple, une agriculture intensive pourrait aboutir à des terres friables et peu aérées, qui sont plus sensibles à l'érosion et aux glissements de terrains. À l'inverse, une ville pourrait s'adapter aux changements climatiques en menant une politique d'urbanisation dans des zones peu exposées aux impacts climatiques. Elle pourrait aussi s'adapter aux vagues de chaleur en diminuant la vulnérabilité des populations, par un accès pour tous à des services essentiels comme l'eau potable ou l'énergie.

¹³ On utilise le terme « impacts physiques du changement climatique » pour désigner les impacts sur l'environnement physique naturel.

¹⁴ Pour plus de détails, cf. Mora et al. 2018. *Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions*.

1. NE PAS TOUT CONFONDRE : IDENTIFIER LES SCÉNARIOS DE TRANSITION
PARMI LES SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT

**FIGURE 10. LES LIENS ENTRE LE SYSTÈME CLIMATIQUE ET LES SYSTÈMES SOCIO-ÉCONOMIQUES EXPLORÉS
PAR LES SCÉNARIOS D'IMPACTS CLIMATIQUES**



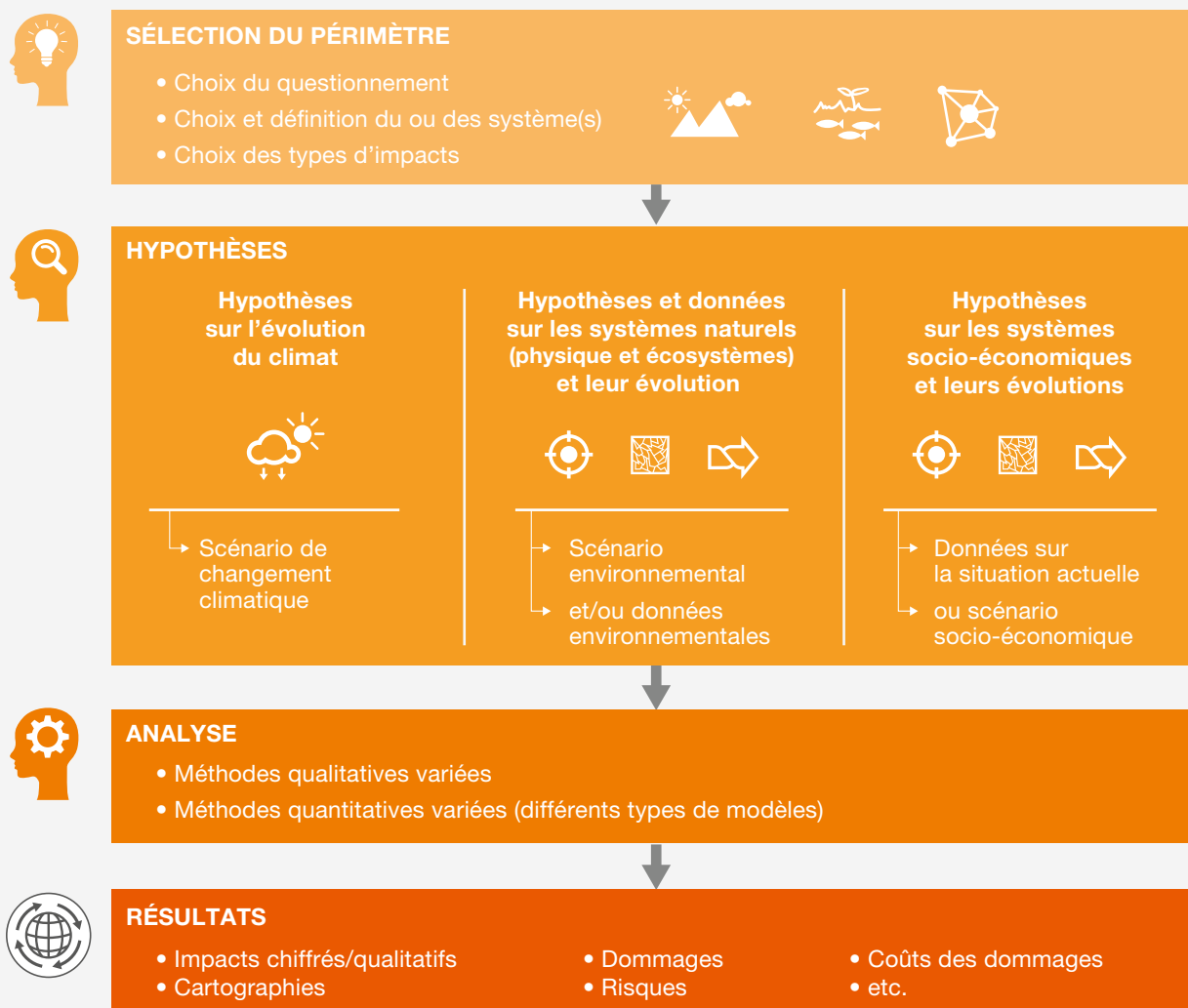
1.4.2 Les scénarios d'impacts climatiques étudient les conséquences d'un scénario de changement climatique sur un système donné

Les scénarios d'impacts climatiques servent à explorer les impacts de l'évolution du climat sur les systèmes liés aux humains (l'environnement physique ; un écosystème ; un système humain tel qu'une ville, une exploitation agricole, etc). Selon la question à laquelle on souhaite répondre, le

scénario intègre parfois aussi une représentation de la dynamique propre aux systèmes étudiés, pour intégrer leur capacité à faire varier les expositions et vulnérabilités.

Les scénarios d'impacts sont construits par des communautés de recherche encore peu fédérées, aux méthodes hétérogènes, et produisant une large gamme de résultats. Il existe ainsi de nombreuses façons de construire des scénarios d'impacts, et le processus décrit ci-dessous et résumé par la Figure 11 n'a pas vocation à être exhaustif.

FIGURE 11. PROCESSUS DE CONSTRUCTION ET ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN SCÉNARIO D'IMPACTS CLIMATIQUES



Source : I4CE, 2019

*Pour un même système : de multiples questions à poser
et de multiples données à mobiliser*

La construction d'un scénario d'impacts débute avec le choix de la question à laquelle on souhaite répondre – c'est de cette question initiale que découlent le choix des systèmes que l'on souhaite étudier (ex. une entreprise, une forêt, un glacier), les phénomènes climatiques (ex. les canicules), les types d'impacts (ex. dommages physiques sur les installations, perte économique liée à la baisse de productivité des travailleurs), l'horizon de temps.

Les scénarios d'impact nécessitent ensuite trois familles d'hypothèses et de données en entrée du scénario. Elles concernent :

- 1. L'évolution du climat** : un scénario d'impacts climatiques utilise comme entrée un scénario de changement climatique, à l'échelle spatiale et l'horizon de temps appropriés.
- 2. Les caractéristiques des systèmes socio-économiques actuelles ou leurs évolutions** : un scénario d'impacts climatiques peut utiliser comme entrée les caractéristiques actuelles du système socio-économique – notamment lorsqu'on s'intéresse aux impacts actuels ou dans un futur très proche, ou utiliser un scénario socio-économique¹⁵ décrivant l'évolution de différents facteurs pouvant notamment aggraver/diminuer l'exposition et la vulnérabilité du système à l'impact considéré (réduction des inégalités, diversification de l'agriculture, évolution de la population, de la demande en eau potable, de l'urbanisation etc.).
- 3. Les systèmes physiques et naturels** qui jouent un rôle dans le scénario d'impacts. Par exemple, un scénario d'impacts climatiques sur les rendements agricoles nécessite des données décrivant les besoins en eaux des différentes cultures, les conditions climatiques idéales pour les cultiver ou encore des hypothèses sur les autres facteurs qui peuvent influencer sur le rendement (évolution des espèces, conflits dans l'utilisation des sols etc.).

En fonction de la question à laquelle on souhaite répondre, on pourra bâtir un jeu de scénarios d'impacts ayant recours à un ou plusieurs scénarios de changement climatique, et éventuellement un ou plusieurs scénarios d'évolution du système considéré.

*Diverses méthodes quantitatives et qualitatives
sont utilisées pour construire un scénario d'impacts
climatiques*

En fonction de l'objet d'étude (système physique, écosystème ou humain ; dommage matériel, pertes économiques etc.), les hypothèses et données peuvent être traitées par des méthodes qualitatives et quantitatives variées. Pour étudier le stress hydrique sur une exploitation agricole, on peut utiliser par exemple un modèle hydrologique représentant un bassin versant, ainsi qu'un modèle de sols, de culture végétale, mais aussi un modèle quantifiant les impacts économiques sur l'exploitation, ses partenaires et son environnement plus large.

**1.4.3 Utiliser les résultats des scénarios
d'impacts comme outils de décision pour
des trajectoires résilientes et adaptées**

De plus en plus de scénarios d'impacts sur les systèmes humains et leur environnement – et les résultats des scénarios – sont disponibles en ligne. Comme indiqué sur la **Figure 11**, ils prennent de multiples formes. Ces scénarios sont généralement sectoriels (ex. : scénarios d'impacts climatiques sur l'agriculture, sur le tourisme, sur la demande en énergie, etc.).

Une organisation peut d'ores et déjà utiliser ces scénarios pour nourrir une réflexion stratégique sur les impacts du changement climatique (par exemple pour augmenter la résilience de la stratégie de l'organisation, pour se mettre en position de saisir les opportunités liées au futur développement de services pour l'adaptation). Dans un premier temps, certains scénarios sectoriels peuvent permettre à l'organisation de se familiariser avec les types d'impacts climatiques qui pourraient l'affecter, et comprendre leurs déterminants. Pour aller plus loin, une organisation peut développer un scénario d'impacts qui lui est spécifique, afin d'affiner sa démarche stratégique de prise en compte du climat. Cela peut s'appuyer sur l'exploration ciblée des résultats de scénarios d'impacts disponibles sur de nombreux portails (voir les exemples proposés dans la **Box 11**).

¹⁵ Les SSP (cf. **Box 12**) peuvent en particulier être utilisés à cette fin.

**BOX 11. EXEMPLES DE PROJETS ET D'ÉTUDES METTANT À DISPOSITION DES DONNÉES RELATIVES
AUX SCÉNARIOS D'IMPACTS CLIMATIQUES ET À LEURS RÉSULTATS**

• **A l'échelle mondiale**

- Le portail en ligne « Oasis Hub » lancé par Climate KIC et d'autres partenaires en 2017 donne accès à de nombreuses données sur les risques liés au changement climatique ;
- Les différents rapports du Groupe II – Impacts, Adaptation et Vulnérabilité du GIEC.

• **A l'échelle européenne**

- Le projet PESETA I, II et III qui a pour but d'évaluer les impacts physiques et socio-économiques du changement climatique en Europe ;
- La plateforme ClimateAdapt, lancée par la Commission européenne et l'Agence européenne l'environnement – elle donne accès et partage de nombreuses informations sur les impacts, les risques et les enjeux d'adaptation au changement climatique ;
- Le projet IMPACT2C soutenu par la Commission européenne pour évaluer les impacts climatiques en Europe d'un réchauffement global de 2°C.

• **A l'échelle nationale**

- Le portail DRIAS qui présente des scénarios d'impacts physiques sur les feux de forêt, les sécheresses et l'enneigement ;
- L'outil Climat^{HD} développé par Météo France, qui renseigne sur l'évolution futur du climat mais aussi sur certains impacts ;
- L'étude « Changement climatique et assurance à l'horizon 2040 », parue en 2015 au nom de la Fédération Française de l'Assurance. Cette étude, coordonnée par le climatologue Jean Jouzel, montre ce que les modèles peuvent nous dire à propos des impacts climatiques en France d'ici 2040. En particulier, l'étude illustre en quoi l'évolution du climat mais aussi l'évolution des systèmes socio-économiques déterminent ensemble les impacts.

2. Se repérer parmi les différents scénarios de transition

Comme décrit précédemment, il existe une grande diversité de scénarios de transition. Elle s'explique notamment par des constructeurs aux visions et aux objectifs distincts, le choix de certaines hypothèses, ou encore l'utilisation de modèles aux propriétés différentes.

Pour se repérer dans cette diversité, cette partie analyse plus en profondeur les éléments qui composent un scénario de transition, décrits précédemment et représentés à nouveau par la **Figure 12**. En s'appuyant sur l'exemple de scénarios existants, elle identifie les différents choix possibles réalisés lors de la construction d'un scénario et leurs implications sur l'interprétation que l'on peut faire des résultats, et plus largement du scénario. Une grille de lecture synthétique d'un scénario de transition est proposée à l'issue de cette partie et appliquée à cinq scénarios publics.

2.1. Le narratif et les hypothèses du scénario : une vision contrastée des évolutions plausibles vers un monde bas-carbone

Les scénarios de transition sont généralement construits à partir d'un narratif décrivant une possible évolution du monde dans un futur plus ou moins proche¹⁶. Ce récit qualitatif peut décrire le contexte socio-économique dans lequel se passe la transition, l'objectif climatique, et certains choix politiques ou technologiques faits pour l'atteindre. Il se décline en une combinaison d'hypothèses démographiques, économiques, politiques, technologiques etc. cohérentes entre elles. **Bien identifier le narratif et les hypothèses est primordial** car l'utilisation d'un scénario en particulier implique l'adoption de toutes ses hypothèses – plus ou moins explicites – et de ce qu'il néglige.

2.1.1 Un scénario de transition prend en compte des hypothèses sur l'évolution du contexte socio-économique

Dans un scénario de transition, des hypothèses sont faites pour décrire les évolutions du contexte socio-économique dans lequel a lieu la transition (représentées en bleu dans la **Figure 4**), qui vont conditionner l'ampleur de l'effort à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif climatique. Elles concernent certains déterminants plus ou moins directs des émissions de GES, comme l'évolution de la démographie, de l'urbanisation, de la croissance économique et des inégalités, la vitesse du progrès technologique, l'adoption de modes de vie intensifs en ressources ou au contraire plus durables, la disponibilité des ressources et le degré de protection, ou de dégradation, de l'environnement dans le futur. Certains scénarios explorent également des évolutions géopolitiques comme l'accentuation de la mondialisation, ou la montée des conflits et des nationalismes.

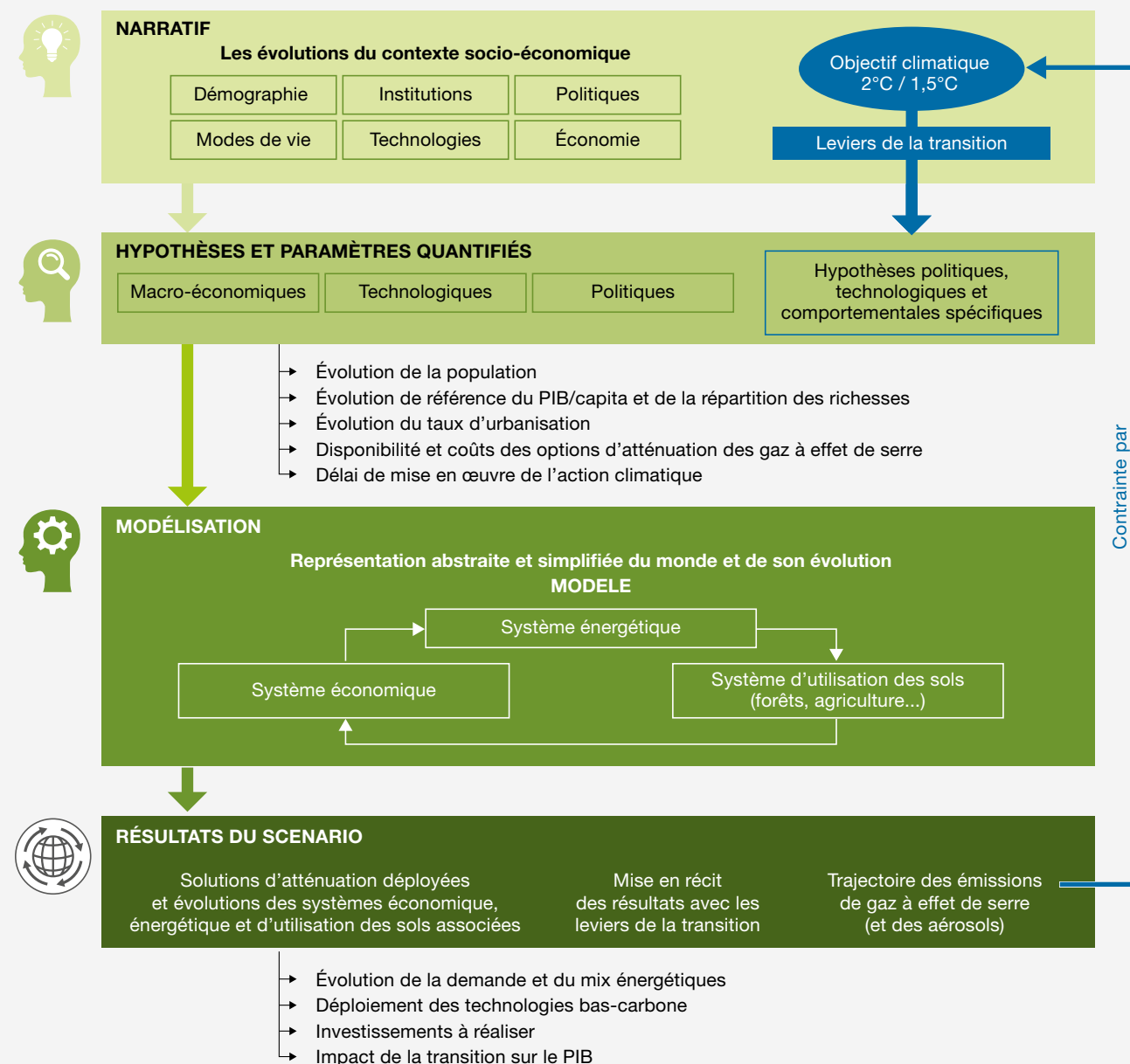
Ces hypothèses peuvent provenir d'exercices de projection réalisés spécifiquement pour le scénario ou bien provenir de projections « de référence » comme celles réalisées par l'ONU pour les **évolutions démographiques mondiales** ou par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) pour la **croissance économique**¹⁷.

Dans le monde de la recherche sur le changement climatique, cinq narratifs socio-économiques, appelés SSP (*Shared Socio-economic Pathways*), ont été établis pour coordonner les travaux des chercheurs (cf. **Box 12**) et la construction de scénarios de transition.

¹⁶ La majorité des horizons temporels des scénarios varie de 2040 à 2100.

¹⁷ Dans certains scénarios, la croissance économique est un résultat du scénario et non une hypothèse d'entrée, voir 2.2.

FIGURE 12. PROCESSUS DE CONSTRUCTION ET ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN SCÉNARIO DE TRANSITION



Source : I4CE, 2019

Note : Cette figure est une illustration stylisée et simplifiée. Notamment, les exemples des différents paramètres qui peuvent être en entrée ou en sortie des scénarios de transition ne sont ni exhaustifs, ni valables pour tous les scénarios. De la même manière, tous les modèles ne comportent pas une représentation de l'économie, de l'énergie, et des secteurs d'utilisation des sols (cf. 2.2).

BOX 12. TRAJECTOIRES SOCIO-ÉCONOMIQUES : LES SSP – “THE SHARED SOCIO-ECONOMIC PATHWAYS”

Que sont les SSP ?

Les SSP sont des narratifs de développement socio-économique explorant des évolutions plausibles du monde en l'absence de politiques et de mesures supplémentaires pour limiter le réchauffement climatique (Riahi *et al.*, 2017). Ils ont été définis par la communauté scientifique pour construire un cadre de réflexion commun et faciliter l'analyse des impacts du changement climatique, des options d'atténuation et d'adaptation, et de leurs coûts.

Comment sont-ils construits ?

Cinq narratifs décrivant des évolutions sociales, économiques, politiques et technologiques possibles d'ici la fin du 21^{ème} siècle ont été établis (Tableau 2). Chaque narratif a été traduit en données quantitatives, concernant notamment la croissance économique, la population, l'urbanisation (O'Neill *et al.*, 2017). Ces hypothèses ont été utilisées en entrée de modèles (cf. 2.2) afin d'obtenir des scénarios de référence pour chaque SSP (c'est-à-dire ne prenant pas en compte d'objectif climat). Ces scénarios associent aux SSP une trajectoire d'évolution de l'utilisation de l'énergie et des sols, ainsi qu'une trajectoire d'émissions de GES. De multiples modèles ont été utilisés à cette fin, ce qui engendre des interprétations alternatives des différents SSP (Riahi *et al.*, 2017). Un modèle a toutefois été choisi comme référence pour chaque SSP : les scénarios correspondants ont été nommés « SSP marqueurs », et ils servent de point de comparaison entre les différents SSP.

Les SSP sont utilisés pour réaliser des scénarios de transition

Les SSP et leurs hypothèses sont utilisés pour réaliser des scénarios de référence, c'est-à-dire non contraints par le respect d'un objectif climatique. Ils sont aussi utilisés pour réaliser des scénarios de transition lorsqu'ils sont contraints par une certaine trajectoire d'évolution des concentrations des GES permettant de limiter le réchauffement climatique – notamment les RCP 2.6 et RCP 1.9 (cf. Box 7). Cette combinaison entre les SSP et les trajectoires de concentrations des GES montre que certaines évolutions socio-économiques, comme la montée des nationalismes et le manque de coordination mondiale (décrits dans le SSP3), sont difficilement voire non compatibles avec la limitation du réchauffement climatique en dessous de 2°C.

TABEAU 2. LES SSP ET LEUR NARRATIF

Scenario	Narratif	Défi pour l'atténuation	Défi pour l'adaptation
SSP1 Développement durable	Forte coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie.	Faible	Faible
SSP2 Poursuite des tendances	Les tendances sociales, économiques et technologiques actuelles se poursuivent, le développement et la croissance progressent de manière inégale selon les pays et les régions. Les institutions nationales et internationales œuvrent à la réalisation des objectifs de développement durable qui progresse lentement. L'environnement se dégrade malgré un développement moins intensif en ressources et en énergie.	Moyen	Moyen
SSP3 Rivalités régionales	Résurgence des nationalismes, développement économique lent, persistance des inégalités et des conflits régionaux. Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux voire régionaux et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Faible priorité internationale pour la protection de l'environnement, qui se dégrade fortement dans certaines régions.	Elevé	Elevé
SSP4 Inégalités	Développement marqué par de fortes inégalités entre et à l'intérieur des pays. Dégradation de la cohésion sociale et multiplication des conflits. Fossé croissant entre une élite connectée et mondialisée, responsable de la majorité des émissions de GES, et un ensemble fragmenté de populations à faible revenu, peu éduqué et vulnérable au changement climatique. Le secteur énergétique se diversifie entre sources d'énergie fortement carbonées et décarbonées. Les politiques environnementales se concentrent sur les enjeux locaux.	Faible	Elevé
SSP5 Développement conventionnel	Développement adossé à l'exploitation forte des énergies fossiles et marqué par des investissements élevés dans la santé, l'éducation et les nouvelles technologies. Adoption de modes de vie intensifs en ressources et en énergie à travers le monde. La croissance économique et le progrès technologique sont élevés. Les problèmes de pollution locale sont bien gérés et l'adaptation est facilitée notamment grâce au recul de la pauvreté.	Elevé	Faible

Sources : Riahi *et al.* (2017), O'Neill *et al.* (2015), Bauer *et al.* (2017)

2.1.2 Les évolutions du contexte peuvent être explorées dans un scénario de référence associé au scénario de transition

Les évolutions socio-économiques sont parfois explorées dans des scénarios non contraints par le respect d'un objectif climatique, dits « scénarios de référence » (*baseline scenarios*). En effet, un scénario de transition est généralement réalisé en comparaison avec un scénario de référence, avec lequel il partage certains éléments de contexte (suivant les scénarios, il peut s'agir des hypothèses sur le taux d'augmentation de la population, l'évolution de la croissance économique, la vitesse du progrès technologique¹⁸, etc.). Construire un scénario de transition par rapport à un scénario de référence donne **la mesure des efforts additionnels à mettre en œuvre pour atteindre un objectif climat dans un certain contexte plus ou moins favorable à la réduction des émissions de GES**. Identifier et comprendre les hypothèses qu'intègre le scénario de référence – quand il existe – est donc primordial pour bien comprendre le scénario de transition et les différences entre les deux scénarios.

Les scénarios de référence suivent une démarche exploratoire appelée aussi *fore-casting* (cf. **Box 6**) : ils se basent sur les tendances actuelles et sur des évolutions plus ou moins en continuité avec le monde d'aujourd'hui. Ils aboutissent à des degrés de réchauffement climatique global dépassant, parfois de plusieurs degrés, l'objectif climatique de 1,5 ou 2°C. Certains scénarios de référence excluent de leur champ toute politique dont l'objectif explicite est de réduire les émissions de GES. Ils peuvent cependant inclure des politiques qui ont pour effet indirect de réduire les émissions (par exemple des politiques de santé ou des politiques environnementales). D'autres scénarios de référence incluent quelques politiques climatiques. Par exemple, les scénarios CPS (pour *Current Policies Scenario*) et NPS (pour *New Policies Scenario*), développés chaque année par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) dans sa publication *World Energy Outlook* (WEO), incluent les politiques climatiques déjà mises en place (CPS et NPS) et celles que les pays se sont engagés à mettre en œuvre (NPS). Cependant, ces scénarios ne sont pas compatibles avec une limitation du réchauffement global en dessous de 2°C.

2.1.3 Un scénario de transition est contraint par le respect d'un objectif climatique

Les scénarios de transition sont contraints par l'atteinte d'un objectif climatique permettant de limiter la hausse globale des températures en deçà de 2°C ou 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle. En pratique, la prise en compte d'un objectif climatique dans les scénarios de transition se traduit par une limite sur les émissions de GES¹⁹. Cette limite peut correspondre à un budget carbone²⁰ : il s'agit d'un montant d'émissions que les émissions totales et cumulées du scénario ne doivent pas dépasser sur une certaine période (cf. **Box 13**). Elle peut aussi correspondre à une contrainte sur la trajectoire d'émissions de GES du scénario : cette dernière doit alors être compatible avec d'autres trajectoires d'émissions permettant de respecter l'objectif climatique de 1,5 ou 2°C (par exemple les RCP 2.6 ou 1.9, cf. **Box 7**).

2.1.4 Un scénario de transition présente une certaine vision de la transition bas-carbone

Les scénarios reflètent la vision de la transition de leur constructeur, et incluent des hypothèses sur la manière d'atteindre l'objectif climatique. Elles traduisent notamment les différents leviers qui rendent la transition possible. Ces hypothèses portent sur :

- la **configuration internationale de l'action climatique**, en particulier l'ampleur et la répartition dans le temps et par pays des efforts climatiques. Par exemple, certains scénarios peuvent décrire une action climatique globale et immédiate, représentant la signature d'un accord global sur le climat avec une participation universelle de tous les pays, ou, au contraire, une action climatique fragmentée et retardée ;
- les **solutions d'atténuation disponibles**, notamment leur faisabilité technique, leur potentiel, leur coût, et leur acceptabilité sociale et politique. Ces hypothèses peuvent varier très fortement d'un scénario à l'autre, certains scénarios font notamment le choix de se passer de certaines technologies encore immatures ou comportant des enjeux de durabilité écologique comme le nucléaire, les technologies CCUS et BECCS. Les hypothèses sur la disponibilité des technologies d'émissions négatives sont particulièrement importantes : des hypothèses favorables au développement de ces technologies permettent de différer l'action climatique dans le temps et modifient ainsi le rythme nécessaire de la réduction des émissions ;

¹⁸ Quand ces paramètres sont des données d'entrée dans les scénarios. En particulier, l'évolution de la croissance économique et la vitesse du progrès technologique peuvent être des paramètres endogènes ou exogènes suivant les scénarios et les modèles utilisés. (cf. 2.2)

¹⁹ La limite sur les émissions dans les scénarios de transition fait référence à une certaine probabilité d'atteinte de l'objectif climatique ou à une fourchette de hausse de températures possible. Cela est notamment dû aux différences dans les résultats des modèles climatiques. En effet, selon les modèles climatiques, une même trajectoire d'émissions peut conduire à des augmentations de température différentes.

²⁰ Le budget carbone s'applique aux émissions de CO₂ seulement. Il doit donc s'accompagner d'hypothèses sur la réduction des émissions des autres GES pour justifier le respect d'un objectif climatique.

BOX 13. BUDGET CARBONE

Le concept de budget carbone correspond à la quantité maximale d'émissions cumulées de CO₂ qu'il ne faut pas dépasser pour limiter le réchauffement climatique global en dessous d'une certaine température. Il est généralement calculé à partir d'une période donnée – d'où la qualification de budget carbone restant. Différentes trajectoires de réduction des émissions sont possibles pour un même budget carbone.

Dans le rapport spécial 1,5°C du GIEC, le budget carbone restant à partir de janvier 2018 est estimé à 1170 GtCO₂ pour maintenir le réchauffement climatique global en dessous de 2°C à la fin du siècle. Il était de 3 400 GtCO₂ à partir de la période préindustrielle (1850-1900), ce qui signifie que nous avons déjà consommé plus de 65 % de ce budget.

Le budget carbone restant à partir de janvier 2018 pour maintenir le réchauffement global en dessous de 1,5°C s'élève à 420 GtCO₂. Il était de 2650 GtCO₂ à partir de l'ère préindustrielle, ce qui signifie que nous avons déjà consommé 84 % de ce budget. Notons qu'en suivant le rythme actuel des émissions – 41,2 GtCO₂ d'émissions mondiales de CO₂ en 2017 –, le budget carbone pour limiter le réchauffement à 1,5°C sera entièrement consommé en moins d'une dizaine d'années.

Le concept de budget carbone est basé sur une compréhension robuste des phénomènes physiques. Cependant, de fortes incertitudes existent concernant l'estimation d'un budget carbone pour respecter un objectif climatique donné. Elles concernent par exemple la réponse du climat aux émissions de CO₂ et des autres GES ou encore les possibles rétroactions du système Terre comme la libération de CO₂ liée à la fonte du permafrost. L'ensemble des incertitudes identifiées dans le rapport 1,5°C du GIEC pourraient augmenter ou réduire les budgets carbone décrits ci-dessus de plusieurs centaines de GtCO₂.

Les estimations des budgets carbone précisées ici ont une probabilité de 66 % de limiter le réchauffement en dessous de l'objectif.

Sources : GIEC (2014a) - Tableau 2.2 ; GIEC (2018) ; IEA (2018b) ; Les Chiffres clés du climat (2019) ; Le Quéré et al. (2018)

- les **politiques et les mesures spécifiques à la réduction des émissions de GES** : il peut s'agir d'hypothèses décrivant des politiques multisectorielles, comme l'instauration d'instruments de tarification du carbone, ou sectorielles, comme l'interdiction de construction de nouvelles centrales à charbon ou la suppression des subventions fossiles, l'instauration de réglementations plus strictes sur les standards d'efficacité énergétique pour la construction de bâtiments neufs ou encore l'instauration de standards d'émissions et d'efficacité énergétique très strictes pour les moyens de transports ;
- Les **changements de comportements** : des hypothèses spécifiques peuvent être faites sur des changements de pratiques ou de certains comportements qui facilitent le respect de l'objectif climatique. Il s'agit par exemple de changements conduisant à la réduction des besoins de mobilité ou à l'adoption de pratiques de consommation en faveur de biens et services bas-carbone et très efficaces en énergie.

Les hypothèses concernant les évolutions du contexte socio-économique, l'objectif climatique, ainsi que les choix faits pour l'atteindre sont traduites en paramètres quantifiés,

qui vont servir de valeurs d'entrée au modèle utilisé pour quantifier les évolutions du scénario.

2.2. L'utilisation de modèles aux propriétés différentes pour construire les scénarios de transition

Les modèles utilisés pour quantifier les scénarios de transition comportent généralement **une représentation de l'économie, du système énergétique et de l'utilisation des sols** (ou seulement un ou deux de ces éléments, en se concentrant généralement sur un)²¹. Ils permettent de quantifier les émissions de GES résultant des trajectoires de développement socio-économiques, et d'explorer les évolutions des systèmes économique, énergétique et d'utilisation des sols compatibles avec la limitation du réchauffement climatique.

Un modèle est **une représentation simplifiée et partielle du monde**, conçu pour **répondre à une problématique spécifique**. Certains modèles sont créés pour représenter le fonctionnement des marchés de l'énergie

²¹ Certains modèles utilisés pour quantifier les scénarios de transition comportent également une représentation très simplifiée du système climatique, ils sont appelés « modèles d'évaluation intégrée », ou IAM, pour « *Integrated Assessment Models* » en anglais.

à l'échelle mondiale²². D'autres cherchent à évaluer les impacts économiques des politiques énergétiques et environnementales²³, alors que certains modèles sont conçus pour évaluer les impacts environnementaux des activités humaines²⁴. **Selon la problématique à laquelle ils répondent, les modèles sont conçus et fonctionnent avec des approches différentes, ils n'ont pas le même périmètre et ne donnent pas les mêmes informations.**

Ainsi, selon le modèle utilisé, la construction du scénario et son interprétation ne seront pas les mêmes. **Identifier les principales caractéristiques du modèle est donc une étape importante pour la lecture d'un scénario.** Le but ici n'est pas de donner une liste exhaustive des différentes caractéristiques des modèles existants mais d'attirer l'attention sur quelques différences clefs entre les modèles qui vont impacter les informations que l'on peut tirer du scénario, et la façon dont on pourra interpréter ses résultats.

2.2.1 Les modèles se différencient selon deux « grands » types d'approches analytiques

Deux « grands » types de modèles utilisés pour construire les scénarios de transition peuvent se distinguer selon l'approche analytique utilisée.

D'un côté, les modèles construits à partir d'une approche macroéconomique du monde : ils visent à représenter l'ensemble de l'économie et des interactions économiques entre les secteurs ainsi que les agents économiques (ménages, banques, gouvernements...). Ils permettent d'analyser l'impact économique des politiques climatiques. Les secteurs et les technologies y sont souvent représentés de manière très agrégée (cf. Figure 13).²⁵

De l'autre, des modèles construits à partir d'une approche technico-économique. Ces modèles sont construits à partir d'une représentation plus ou moins fine des technologies (leurs coûts d'opération, leurs facteurs d'émissions, etc.) et sont souvent sectoriels (notamment pour le système énergétique) (cf. Figure 14). Contrairement aux modèles macroéconomiques, l'activité économique est généralement exogène dans ces modèles et les interactions économiques entre les différents acteurs et secteurs ne sont pas représentées²⁶.

Selon les types de modèles, **certaines paramètres feront partie des hypothèses d'entrée ou au contraire des sorties du modèle.** Par exemple, l'évolution de la croissance du PIB est généralement endogène – c'est-à-dire générée à travers le modèle – aux modèles macro-économiques, qui permettent d'évaluer les retombées économiques de la transition décrite par le scénario. À l'inverse, l'évolution du PIB est généralement exogène aux modèles construits à partir d'une approche technico-économique, elle est fixée par le modélisateur comme hypothèse d'entrée au modèle.

Afin d'élargir leur périmètre, certains modèles intégrés combinent parfois les deux types d'approches décrites plus haut. Par exemple, ils peuvent intégrer plusieurs modules : un pour représenter l'économie dans son ensemble et un ou plusieurs autres modules pour représenter le système énergétique et ses secteurs d'activités (habitat, tertiaire, transports, industrie, agriculture)²⁷.

Au-delà de la combinaison des deux approches au sein d'un même modèle, certains modèles aux secteurs et aux approches différentes peuvent être couplés, c'est-à-dire utilisés conjointement, avec les résultats d'un modèle servant d'entrée à d'autres modèles. Ce couplage peut servir par exemple pour explorer à la fois le déploiement de solutions d'atténuation, et l'impact macroéconomique de la transition bas-carbone²⁸.

22 Exemple : le WEM développé par l'AIE.

23 Exemple : le modèle GEMINI-E3 développé par l'Institut technologique de Lausanne.

24 Exemple : le modèle IMAGE développé par l'Université d'Utrecht et l'Agence d'évaluation environnementale néerlandaise.

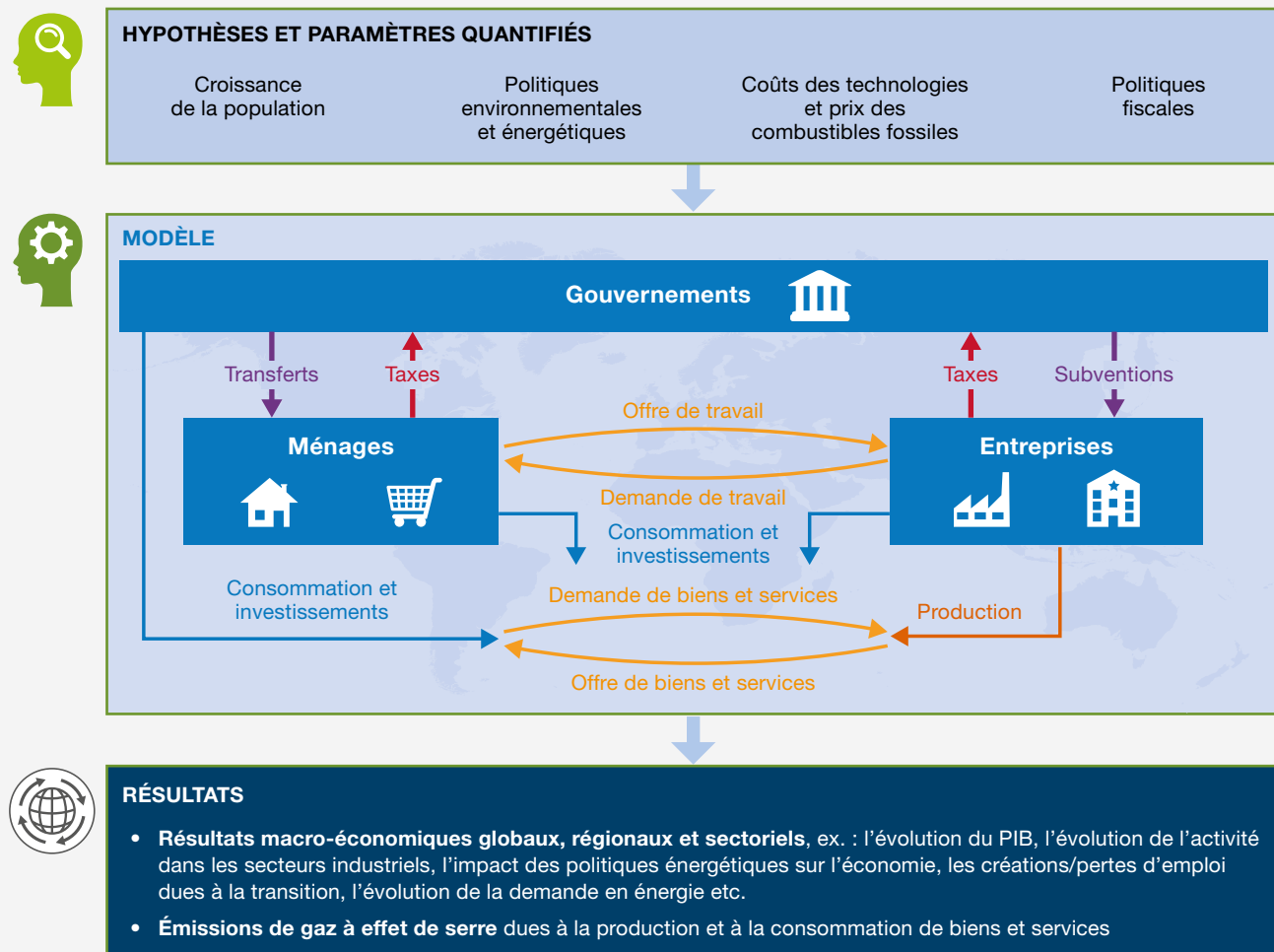
25 Ces modèles sont dits « descendants », ou top-down. Exemple : le modèle GEMINI-E3 développé par l'Institut technologique de Lausanne.

26 Ces modèles sont dits « ascendants », ou bottom-up. Exemples : le modèle POLES développé par le Centre commun de recherche de la Commission européenne, le modèle Négawatt de simulation du système énergétique français.

27 Ces modèles sont dits hybrides. Exemples : le modèle REMIND développé par l'Institut de Postdam pour la recherche sur l'impact climatique, le modèle IMACLIM-R développé par le CIRED.

28 Par exemple, le modèle MESSAGE-GLOBIOM se compose de cinq modèles différents : deux principaux qui représentent le système énergétique (MESSAGE) et le système d'utilisation des sols (GLOBIOM) et trois autres représentant respectivement le système macro-économique, les émissions de GES et les autres polluants, et le système climatique. Il est développé par l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA).

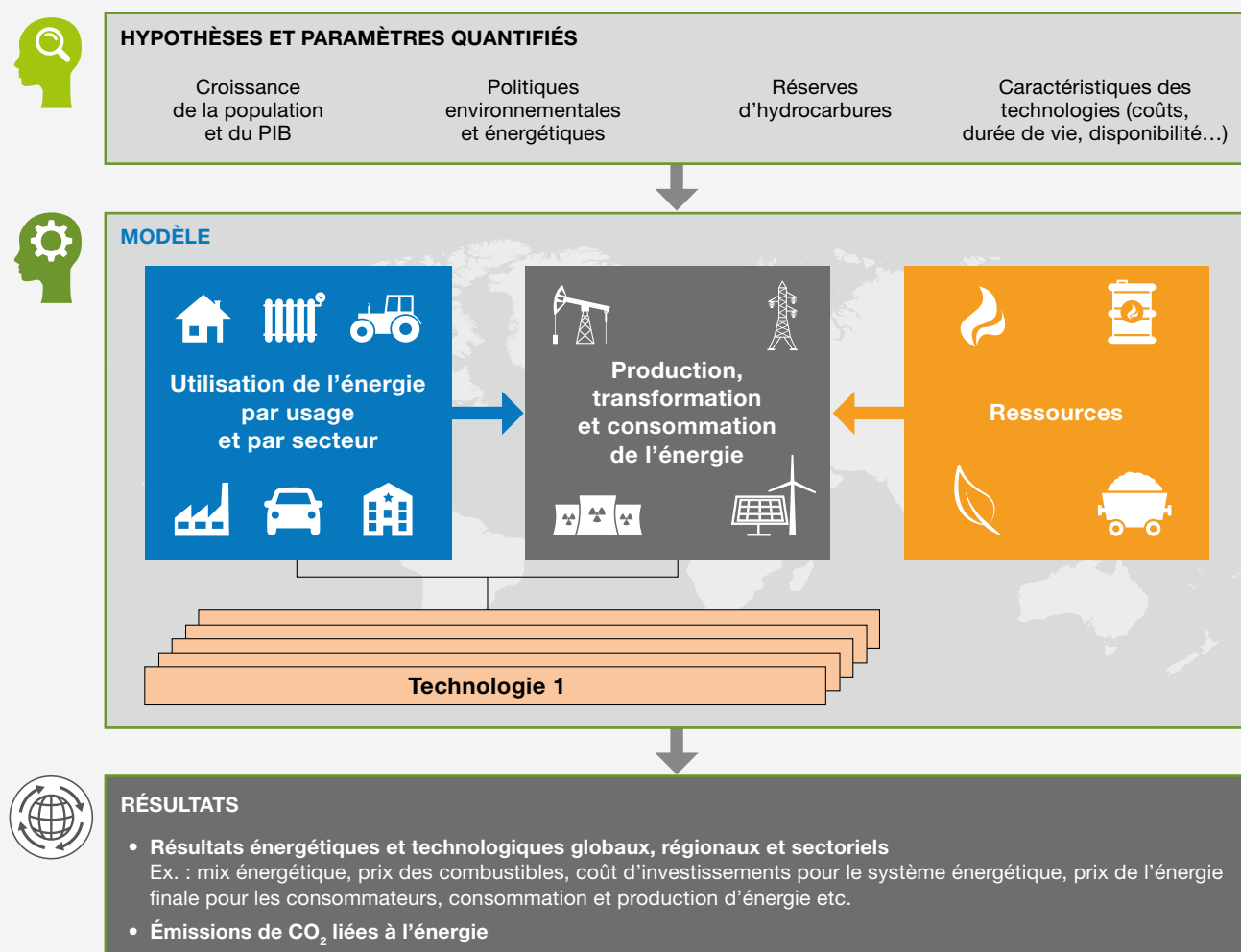
FIGURE 13. FONCTIONNEMENT SIMPLIFIÉ D'UN MODÈLE MACRO-ÉCONOMIQUE



Source : I4CE, 2019 - Figure inspirée du modèle « DSGE » (Dynamic stochastic general equilibrium) développé par l'IBS – Institute for structural research.

Note : cette Figure est une représentation illustrative, simplifiée et donc partielle d'un modèle de type macro-économique.

FIGURE 14. FONCTIONNEMENT SIMPLIFIÉ D'UN MODÈLE TECHNICO-ÉCONOMIQUE - EXEMPLE REPRÉSENTANT LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE GLOBAL



Source : I4CE, 2019. Figure inspirée du modèle POLES et du WEM - World Energy Outlook utilisé et développé par l'AIE.

Note : Cette Figure est une représentation illustrative, simplifiée et donc partielle d'un modèle de type technico-économique.

2.2.2 Les principes théoriques et de fonctionnement, le périmètre et le niveau de détails du modèle influent sur les résultats du scénario

Les modèles sont basés sur différents fondements théoriques

Les modèles sont composés d'un ensemble d'équations, tirées de la théorie économique ou bien des sciences techniques et physiques pour représenter les phénomènes économiques, le fonctionnement des technologies ainsi que les phénomènes naturels. Ces équations varient selon les fondements théoriques du modèle, et cela influence les résultats du scénario. Par exemple, les

modèles peuvent s'appuyer sur différentes conceptions théoriques de l'économie qui influencent la représentation du fonctionnement de l'économie et de ses composantes, comme le fonctionnement du marché du travail et le chômage, la productivité du travail, la facilité de substitution entre les différentes technologies.

Un modèle peut fonctionner de façon à décrire une trajectoire optimale selon un critère retenu

La façon dont sont résolues les équations du modèle, et les principes de fonctionnement de celui-ci influencent aussi les résultats. Par exemple, certains modèles vont chercher à décrire les « meilleures » évolutions possibles du monde en fonction de critères retenus, comme la

minimisation des coûts d'atténuation²⁹, ou la maximisation du bien-être³⁰. Ce type de modèle fonctionne de manière optimale. D'autres modèles au contraire simulent les évolutions possibles du monde sans chercher à obtenir des trajectoires optimales³¹.

Un modèle fonctionne différemment selon la façon dont sont représentées les anticipations des acteurs

La façon dont fonctionne le modèle varie aussi selon l'anticipation des acteurs représentés par le modèle. Deux possibilités existent : ou bien les acteurs prennent leurs décisions « au jour le jour » d'après les informations disponibles au moment de la décision ; ou bien ils sont capables d'anticiper les évolutions futures et de prendre ainsi les meilleures décisions possibles non seulement selon les informations disponibles au moment de la décision, mais aussi selon les évolutions futures qu'ils connaissent par avance. La façon dont sont représentées les anticipations des acteurs influencent les résultats. Par exemple, dans un modèle qui simule les décisions des acteurs « au jour le jour », il est très probable que certaines technologies soient encore installées à court terme alors qu'elles ne pourront plus être utilisées à moyen et long terme pour respecter l'objectif climatique (ex. : les centrales à charbon sans CCUS). Au contraire, dans un modèle avec une anticipation parfaite des acteurs qui minimise les coûts d'atténuation sur l'ensemble de la période considérée, les choix technologiques se porteront de manière très précoce vers des technologies bas-carbone pour anticiper les contraintes futures sur les émissions de GES.

Le périmètre et la granularité du modèle conditionnent les informations qui seront disponibles sur le scénario

Les modèles se distinguent selon leur périmètre et leur granularité – qui conditionnent les informations disponibles sur les résultats du scénario (cf. 2.3) – en particulier concernant les aspects suivants :

- le **périmètre géographique** et le **niveau de désagrégation** des régions représentées (multirégional, régional, national, local...) ;
- l'**horizon temporel** (2050, 2060, 2100...) et le **pas de temps**, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre les mises à jour des évolutions ;
- les types **d'émissions de GES** et d'autres polluants considérés dans le modèle ;

- les **secteurs représentés** et le niveau de détails avec lequel ils sont représentés (industrie, agriculture, utilisation des sols, ...) ;
- les **marchandises / commodités** représentées et le niveau de détails avec lequel elles sont représentées : biens énergétiques et non énergétiques, eau, déchets... ;
- les **technologies**, et plus largement les **solutions d'atténuation** représentées et le niveau de détails avec lequel elles sont représentées.

Identifier le périmètre du modèle est important pour bien interpréter ses résultats. Par exemple, un modèle qui ne représente pas le système d'utilisation des sols ne peut pas nous informer sur les évolutions des émissions de GES du système agricole (hors consommation d'énergie)³², ni sur les solutions d'atténuation déployées dans ce domaine. L'utilisation de l'énergie étant la principale source d'émissions de GES (cf. **Box 3**), de nombreux scénarios concentrent leur périmètre sur le système énergétique et sur les secteurs utilisateurs de l'énergie.

A noter que la plupart des scénarios ne couvrant pas l'ensemble des GES et de leurs sources, des hypothèses doivent être prises par les modélisateurs pour pouvoir comparer les émissions de leurs scénarios avec les trajectoires aboutissant à un degré de réchauffement donné – notamment sur les secteurs et les GES non pris en compte dans le scénario. De même, les objectifs climatiques s'exprimant en degrés de réchauffement à horizon 2100, des hypothèses doivent parfois être faites sur les trajectoires d'émissions des scénarios au-delà de leur horizon temporel.

La représentation des mesures et politiques climatiques dépend des caractéristiques du modèle utilisé

Dans des modèles représentant les technologies de manière explicite, des standards de performance énergétique peuvent être représentés comme une contrainte sur l'efficacité des différentes technologies. Au contraire, les politiques énergie-climat peuvent parfois être représentées par des « proxy », comme un prix carbone (cf. **Box 14**), ou une taxe énergétique pour faire baisser la consommation énergétique et représenter des politiques d'efficacité énergétique.

29 Exemple : le modèle **MESSAGE** développé par l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA).

30 Exemple : le modèle **REMIND**.

31 Exemple : le **WEM** développé par l'AIE.

32 Exemple : le **WEM** développé par l'AIE.

BOX 14. DES CLEFS POUR INTERPRÉTER LE PRIX DU CARBONE DANS LES SCÉNARIOS DE TRANSITION

Le prix du carbone consiste à attribuer un prix au fait d'émettre ou non des GES^a. Deux instruments politiques principaux permettent d'attribuer un prix explicite au carbone : une taxe imposée sur les émissions de GES (taxe carbone) ou bien un marché sur lequel s'achètent et se vendent des permis d'émettre (système d'échange de quotas d'émission). En complément des prix du carbone explicites, d'autres politiques qui encouragent les réductions d'émissions de GES (comme les politiques de soutien des énergies renouvelables ou la mise en place de normes d'émissions) donnent implicitement un prix au fait de réduire les émissions de GES.

- **Le prix du carbone dans les scénarios de transition**

Dans les scénarios de transition, le prix du carbone peut résulter de diverses approches. Une approche, dite de **coûts-bénéfices**, consiste à évaluer la trajectoire socialement optimale des émissions de GES – et donc le niveau de réchauffement climatique – en minimisant l'ensemble des coûts associés au changement climatique – les dommages causés par le changement climatique et les coûts nécessaires pour réduire les émissions. Cette approche permet d'estimer le **coût social du carbone** (social cost of carbon), qui correspond au coût actualisé lié à l'émission d'une tonne de CO₂ ou de la quantité correspondante d'un autre GES^b.

Une autre approche, dite de **coût-efficacité**, consiste à évaluer la trajectoire d'atténuation à moindre coût qui permet d'atteindre un objectif climatique donné. Cette approche permet d'estimer le **coût fictif** (shadow price) ou **valeur tutélaire du carbone**, qui correspond au coût des solutions à mettre en place pour réduire les émissions de GES de manière à respecter l'objectif climatique fixé.

Enfin, dans certains scénarios, le prix du carbone est une donnée d'entrée, qui permet de **représenter la mise en place de politiques de tarification explicite du carbone** (taxes ou marchés).

- **Comment interpréter le prix du carbone dans les scénarios ?**

La plupart des scénarios de transition intègrent un prix du carbone, qui généralement est **une donnée d'entrée** ou découle d'**une approche coût-efficacité à objectif climatique donné**. Le prix du carbone ne peut pas être interprété de la même manière dans ces deux situations. Dans la première, le prix du carbone représente la mise en place de marchés ou taxes carbone. Sa valeur est une hypothèse faite par les constructeurs du scénario, elle ne découle pas de la dynamique du modèle utilisé. C'est le cas pour le scénario SDS de l'AIE par exemple^c, où le prix du carbone est accompagné de nombreuses autres politiques, telle que la mise en place de standards d'efficacité énergétique dans l'industrie et le bâtiment.

Dans le second cas, le prix carbone représente **un prix fictif qui reflète l'effort de réduction des émissions** au cours du temps imposé par le respect d'un certain objectif climatique. Dans ce cas, le prix découle de la dynamique du modèle utilisé, et ne représente pas la mise en place de politiques de tarification explicite du carbone. C'est l'approche qui a été utilisée par exemple dans les exercices de modélisation qui ont servi à établir la valeur de l'action pour le climat en France en 2018^d. L'estimation du prix fictif dépend très fortement des hypothèses du scénario mais aussi des caractéristiques du modèle utilisé (cf.2.2). Par exemple, un modèle qui représente un large portefeuille de solutions d'atténuation et qui est plus flexible sur les solutions mobilisables résulte généralement sur des coûts d'atténuation – et donc un prix du carbone – moins élevés que ceux provenant des modèles moins flexibles sur les solutions mobilisables^e.

Sources : Guivarch et Rogelj (2017), France Stratégie (2019), GIEC - Rogelj et al. (2018)

- Un prix carbone peut porter uniquement sur les émissions de CO₂ ou concerner également d'autres GES.
- Ce calcul se fait grâce aux modèles qui permettent d'évaluer l'impact du changement climatique sur les systèmes socio-économiques. Cette approche a notamment été utilisée pour le rapport Stern (Stern N. (2006), *Stern review : The Economics of Climate Change*, United Kingdom).
- Dans la version 2018 du scénario, le prix du CO₂ est 63\$/tCO₂ en 2025 et 140\$ en 2040 dans les pays développés, et 43\$/tCO₂ en 2025 et 125\$ en 2040 dans une sélection de pays en développement.
- L'estimation de la valeur de l'action pour le climat a pour but d'identifier les actions sectorielles et les investissements les plus pertinents pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050 en France. Elle a été estimée à 250€/tCO₂ en 2030, sur la base d'exercices de modélisation qui ont mobilisé des modèles technico-économiques et macro-économiques.
- Pour en savoir plus, l'étude intitulée « Carbon price variations in 2°C scenarios » réalisée par C. Guivarch compare les prix du carbone générés par différents modèles.

2.3. Les résultats des scénarios : des informations qualitatives et quantitatives plus ou moins détaillées sur les transformations engendrées par la transition

2.3.1 Les scénarios de transition fournissent des éléments quantitatifs sur l'évolution des systèmes socio-économiques

Les scénarios se présentent généralement sous la forme d'un rapport écrit – parfois accompagné de tableaux de données ou d'annexes techniques – présentant les résultats de l'exercice de modélisation. Ces résultats peuvent comporter des évolutions quantitatives relatives :

- **A l'économie**, ex. : les emplois générés, la contraction ou l'expansion de secteurs clefs, les impacts de la transition sur le PIB, les investissements nécessaires à la transformation des systèmes énergétiques ou électriques, à l'évolution du prix du carbone (cf. **Box 14**).
- **Au système énergétique**, ex. : l'évolution de la consommation d'énergie primaire et finale, globale et par secteur, l'évolution du mix énergétique et de la part des différentes énergies (fossiles, renouvelables, nucléaire) à l'échelle du monde et/ou par région.
- **Au système d'utilisation des sols**, ex. : la production et la demande agricole, les changements dans l'utilisation des sols (afforestation / déforestation...).
- **Aux trajectoires d'émissions des GES** au niveau global, par secteur et par zone géographique.
- **Aux solutions d'atténuation déployées et aux technologies associées** : les différents types de solutions sont décrits plus haut, dans la partie dédiée aux enjeux de la transition. Elles sont aussi décrites dans la grille de lecture.

Les scénarios comportent rarement des résultats dans chacune des cinq rubriques ci-dessus. En particulier, selon le type de modèle utilisé, les résultats ne seront pas les mêmes. Par exemple, un modèle technico-économique représentant le système énergétique aboutit sur des résultats détaillés concernant les technologies utilisées et l'évolution du mix énergétique (cf. **Figure 14**) alors qu'un modèle plutôt économique et global permet d'avoir des résultats sur les impacts de la transition sur l'emploi et la croissance économique (cf. **Figure 13**). Par ailleurs, la granularité des résultats du scénario est limitée par celle du modèle (cf. **2.2.2**), mais les résultats sont souvent présentés de manière plus agrégée que les informations disponibles dans le modèle.

2.3.2 Les résultats et les hypothèses des scénarios sont mis en récit pour créer un narratif cohérent autour de la transition

Les résultats des scénarios se composent aussi d'éléments qualitatifs qui mettent en récit les évolutions quantifiées données directement en sortie des modèles. Cette mise en récit mêle à la fois hypothèses et résultats du scénario pour créer un narratif cohérent autour de la transition. Elle permet de donner de la crédibilité au scénario, en détaillant notamment les leviers qui soutiennent la transition (cf. **1.2.1**). Cette mise en récit peut par exemple inclure des informations sur les différentes mesures politiques mises en place, ou bien des changements de comportements adoptés, ou encore des ruptures technologiques nécessaires à la mise en place des solutions décrites.

3. Huit étapes pour décrypter les scénarios de transition

3.1. Grille de lecture des scénarios de transition

La grille de lecture suivante synthétise les principales étapes à suivre pour lire et interpréter ces scénarios, ainsi que leurs principaux paramètres. Elle est ensuite appliquée à une sélection de cinq scénarios.

1

Identifier le cadre dans lequel a été élaboré le scénario de transition

- **Enjeux** : Le cadre d'élaboration du scénario, la vision de son constructeur et le but recherché orientent l'approche du scénario ainsi que les choix réalisés lors de sa construction – choix qui déterminent en grande partie les résultats du scénario. Avant d'entrer dans le contenu du scénario, il est donc important de comprendre dans quel contexte il a été créé, par quel organisme et dans quel but. Par ailleurs, il est important de se familiariser dans les grandes lignes avec la vision de la transition décrite par le scénario (intégration d'autres objectifs que l'objectif climatique, description d'une action climatique globale/fragmentée, identification d'une trajectoire optimale – suivant un ou plusieurs critères – pour atteindre l'objectif climatique...).
- **Informations/paramètres à identifier** : organisation qui produit le scénario, but(s) recherché(s), date et contexte de la publication, fréquence de la mise à jour du scénario, grandes lignes de la transition décrite par le scénario.

2

Identifier le niveau d'informations disponibles sur le scénario

- **Enjeux** : Selon le cadre de leur élaboration, les scénarios n'ont pas toujours le même support : s'ils se présentent très souvent sous forme de rapports écrits, ces rapports sont plus ou moins longs, détaillés et techniques selon les scénarios. Parfois un résumé synthétique est rendu public, alors que le rapport détaillé n'est pas accessible à tous. Des informations sur la méthodologie – en particulier le modèle – et les sources des données utilisées sont parfois rendues publiques, de même que des tableaux ou infographies présentant les résultats. Le niveau d'informations disponibles sur le scénario va conditionner l'usage qui pourra en être fait.
- ⚠ Les informations disponibles sur le scénario dépendent du support sur lequel sont présentés les résultats, mais aussi du périmètre et de la granularité du modèle utilisé. Au-delà des résultats rendus publics, des données plus désagrégées peuvent exister dans le modèle.
- **Informations/paramètres à identifier** : support de publication, existence d'annexes méthodologiques ou de tableaux de résultats, périmètre (géographique, sectoriel, horizon temporel), granularité des résultats (géographique, sectorielle, temporelle).

3

Comprendre dans quel contexte socio-économique a lieu la transition décrite par le scénario

- **Enjeux** : Le contexte socio-économique futur envisagé dans le scénario – qui correspond aux évolutions du monde (démographiques, économiques, géopolitiques, institutionnelles...) hors atteinte de l'objectif climatique – peut être plus ou moins favorable à la réduction des GES. Comprendre ce contexte est essentiel pour identifier les enjeux de la transition décrite dans le scénario.
- ⚠ Ces évolutions peuvent être explorées dans un scénario de référence associé au scénario de transition. Les résultats du scénario de transition étant parfois présentés en différentiel par rapport à ce scénario de référence, il est essentiel de bien comprendre les hypothèses qu'intègre celui-ci.
- **Informations/paramètres à identifier** : l'existence d'un scénario de référence et ses principales hypothèses, les hypothèses sur le contexte socio-économique (évolution de la croissance économique ou de ses déterminants, de la population, des modes de vie, du progrès technologique, du taux d'urbanisation, du taux d'inégalité, du degré de globalisation/de coopération internationale...).

4

Identifier l'objectif climatique et la répartition des efforts dans le temps

- **Enjeux** : La trajectoire et les résultats du scénario de transition sont conditionnés par le respect d'un objectif climatique, généralement exprimé sous forme de limite sur le réchauffement climatique global à horizon 2100. Cet objectif peut être pris en compte de différentes manières dans le scénario (respect d'un budget carbone, comparaison des trajectoires d'émissions avec des trajectoires de référence comme les RCP, utilisation d'un modèle climatique). La probabilité associée à l'atteinte de l'objectif donne une indication supplémentaire de

l'ambition du scénario. Par ailleurs, la trajectoire de réduction des émissions informe sur la répartition des efforts dans le temps.

⚠ A noter que les scénarios dans lesquels les efforts de réduction sont retardés dans le temps ont généralement recours à des techniques d'émissions négatives pour respecter l'objectif climatique.

⚠ Pour les scénarios dont l'horizon temporel s'arrête avant la fin du siècle, il est important de regarder si des hypothèses sont faites/admises concernant l'évolution des émissions de GES sur la période non-couverte par le scénario et de comprendre leurs implications en matière d'efforts de réduction nécessaires, de possibles ruptures avec les évolutions décrites par le scénario, et de recours aux techniques d'émissions négatives. Ces hypothèses sur l'évolution des émissions au-delà de la période couverte par l'horizon temporel du scénario sont déterminantes sur les montants de réductions d'émissions nécessaires dans le scénario. Elles ne sont pas toujours explicites.

- **Informations/paramètres à identifier** : l'objectif climatique visé, la probabilité qui lui est associée, la manière dont il est pris en compte par le scénario, l'évolution de la trajectoire des émissions de GES, les hypothèses faites/admises concernant l'évolution des émissions de GES en dehors de la période couverte par le scénario.

5

Identifier le poids donné aux différents leviers de la transition et les hypothèses associées

- **Enjeux** : Chaque scénario s'appuie sur des leviers de changement – principalement politiques, technologiques et comportementaux – qui permettent de mettre en place les solutions identifiées dans à l'étape 7. Selon les scénarios, le poids donné aux différents leviers n'est pas le même. Identifier les leviers sous-jacents au scénario permet de comprendre comment la transition – et les transformations en profondeur qu'elle implique – sont expliquées par le constructeur de scénario.

⚠ Le poids donné aux différents leviers de la transition peut généralement s'appréhender grâce à la mise en récit faite autour du scénario, qui mêle hypothèses et résultats pour créer un narratif cohérent autour de la transition. Cette mise en récit, qui permet au constructeur de justifier les résultats du scénario et d'expliquer comment les différentes solutions d'atténuation sont mises en place, alimente la crédibilité du scénario³³.

⚠ Le prix du carbone ne représente pas toujours l'instauration d'un prix explicite du carbone via un système de taxe ou de marché d'échanges de quotas d'émissions. Il représente parfois un prix fictif qui reflète l'effort de réduction des émissions au cours du temps imposé par le respect d'un certain objectif.

- **Informations/paramètres à identifier** : les mesures / réglementations / politiques soutenant la mise en place des solutions d'atténuation, la valeur et la signification du prix carbone, les changements de comportement et les progrès technologiques nécessaires à la transition.

6

Analyser les répartitions géographique et sectorielle des efforts de réduction

- **Enjeux** : De nombreux scénarios comportent des éléments sur l'évolution des émissions selon les secteurs émetteurs : **bâtiment, transport, industrie, production d'énergie, agriculture**. Les transformations profondes qu'implique la réduction des émissions ne sont pas portées par les mêmes secteurs selon les scénarios. La répartition géographique des réductions d'émissions – et donc des efforts d'atténuation – varie également suivant les scénarios. La répartition des efforts entre secteurs/pays découle de la dynamique du modèle et des hypothèses d'entrée du scénario³⁴.

⚠ Les trajectoires d'émissions ne sont pas toujours comparables entre les scénarios : **les secteurs émetteurs et les types de GES** pris en compte varient. Cela est en partie dû au modèle utilisé pour quantifier le scénario.

⚠ Il est important de comprendre les hypothèses faites **sur l'évolution des émissions de GES et des secteurs non représentés dans le scénario** (et le modèle sous-jacent), qui conditionnent l'effort de réduction des émissions nécessaires dans les secteurs pris en compte par le scénario³⁵. De même, dans le cas d'un

33 Par exemple, l'augmentation du taux de charge des véhicules dans un scénario peut être expliquée par la mise en place d'une politique ambitieuse de covoiturage et d'une réglementation sur la circulation à vide des poids lourds.

34 Cette répartition peut par exemple découler d'une minimisation des coûts de la transition avec un modèle d'optimisation. Elle peut également intégrer d'autres critères, par exemple une convergence des émissions par habitant.

35 Ce point de vigilance s'applique aussi pour les secteurs représentés de manière très simplifiée, et dont les hypothèses ne sont pas forcément explicites dans le scénario – même si cela est plus difficile à détecter.

scénario régional/national, il est important de comprendre les hypothèses faites sur les **réductions d'émissions dans le reste du monde**.

- **Informations/paramètres à regarder** : la trajectoire d'émissions de GES du scénario, l'évolution des émissions par secteur/zone géographique, les hypothèses concernant l'évolution des émissions dans les secteurs/zones géographiques non pris en compte par le scénario (rarement indiquées).

7 Identifier les solutions déployées pour réduire les émissions de GES et les technologies associées

- **Enjeu** : Le poids donné aux différentes solutions d'atténuation diffère suivant le scénario. Elle reflète une vision spécifique de la transition, qui découle de l'approche et de la vision des constructeurs du scénario. Les solutions d'atténuation envisagées dépendent également du périmètre du modèle utilisé et des secteurs représentés.

⚠ La représentation des solutions d'atténuation dans le scénario – et donc les informations disponibles sur ces solutions – dépendent du modèle utilisé, de son périmètre, de son approche (technico-économique, avec une représentation plus ou moins fine des technologies, ou plutôt macro-économique), et de sa granularité.

- **Informations/paramètres à regarder** : Exemples de paramètres permettant d'identifier les solutions déployées et leur poids relatif, par grande catégorie de solutions d'atténuation :

- **La maîtrise de la demande en énergie et en matériaux intensifs en émissions de GES** : la part de réduction des émissions due à l'efficacité énergétique en global et par secteur ; l'évolution de la consommation en énergie primaire ; l'évolution de la consommation en énergie des différents secteurs d'utilisation de l'énergie ;
- **La décarbonation du mix énergétique** : la part des différentes énergies renouvelables dans le mix énergétique, l'évolution de la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie, la part du nucléaire dans le mix électrique, le taux de déploiement des technologies CCUS ;
- **La maîtrise des émissions du système agricole** : l'évolution des émissions du secteur agricole, l'évolution de la consommation d'aliments carnés ;
- **Le recours aux émissions négatives** : le montant d'émissions négatives, les capacités de BECCS mises en place, les puits forestiers mobilisés.

Le récit qualitatif accompagnant le scénario peut également être utile pour appréhender la place des différentes solutions d'atténuation.

8 Identifier les conséquences macro-économiques de la transition

- **Enjeu** : Au-delà des enjeux technologiques et politiques, les implications macro-économiques de la transition (investissements, impacts sur l'emploi et la croissance etc.) évaluées dans le scénario sont importantes pour mieux appréhender les enjeux économiques liés aux transformations nécessaires à la transition.

⚠ Les scénarios n'informent pas toujours sur les implications macro-économiques de la transition, cela dépend notamment du type de modèle utilisé pour quantifier le scénario. Certains paramètres doivent ainsi être interprétés différemment selon la façon dont ils ont été générés (par exemple, si l'évolution de la croissance économique est fixée comme hypothèse par le constructeur en amont du scénario, sa valeur n'intègre pas les conséquences économiques de la transition.)

⚠ Les impacts macroéconomiques de la transition – quand ils sont donnés dans le scénario – sont souvent présentés en différentiel par rapport à un scénario de référence. Notons que dans la majorité des cas, ce scénario – et le scénario de transition – n'intègrent pas les impacts du changement climatique.

- **Informations/paramètres à regarder** : L'évolution de la croissance économique et les impacts de la transition sur la croissance économique, les investissements nécessaires aux transformations décrites dans le scénario, les conséquences de la transition sur l'emploi, l'évolution des prix de l'électricité ou de l'énergie pour les consommateurs finaux.

3.2. Une sélection de scénarios de transition passés à la loupe

La grille de lecture précédente est appliquée à une sélection de 5 scénarios de transition publics, qui vise à être représentative de la diversité des scénarios existants.

ÉTAPE 1

IDENTIFIER LE CADRE DANS LEQUEL A ÉTÉ ÉLABORÉ LE SCÉNARIO DE TRANSITION

	Organisation	Date de parution	Fréquence de mise à jour	But(s) recherché(s) par le scénario et grandes lignes de la transition présentée
AIE - Scénario SDS	L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) est une organisation intergouvernementale , créée par l'OCDE à la suite du premier choc pétrolier dans le but initial d'assurer la sécurité énergétique des pays membres de l'OCDE , en particulier concernant l'approvisionnement en pétrole. Ses missions se sont élargies aujourd'hui : elle informe et conseille les Etats sur les enjeux énergétiques en fournissant de nombreuses données et analyses.	2018	Annuelle	La publication du World Energy Outlook (WEO) a pour but de présenter des scénarios d'évolution des marchés de l'énergie sur les moyen et long termes, en fonction des politiques publiques affectant le secteur de l'énergie. <i>Objectif du SDS :</i> <ul style="list-style-type: none">• Décrire une évolution du secteur de l'énergie compatible avec l'accès universel aux services énergétiques modernes d'ici 2030, et cohérente avec les objectifs de l'Accord de Paris ainsi qu'avec la diminution de la pollution de l'air.
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	Greenpeace est une organisation non-gouvernementale militante pour la protection de l'environnement et de la biodiversité . Depuis 2005, elle produit des scénarios d'évolution du système énergétique permettant de répondre aux enjeux de durabilité écologique.	2015	5 éditions du rapport Energy Revolution ont été publiées depuis 2005.	<i>Objectifs :</i> <ul style="list-style-type: none">• Présenter une trajectoire permettant de réduire totalement les émissions de CO₂ liées à l'énergie, d'avoir un système énergétique 100 % renouvelable et de sortir du nucléaire.• Montrer qu'un tel futur est réalisable et souhaitable en décrivant ses implications et les conditions de sa réalisation.
IRENA - Scénario REmap	L'IRENA est une organisation intergouvernementale dont l'objectif est d'informer les pays sur le développement des énergies renouvelables (implications politiques, économiques financières, technologiques etc.) et d'encourager l'adoption à grande échelle et l'utilisation durable de toutes les formes d'énergies renouvelables.	2019	Mise à jour annuelle depuis sa création (en 2017).	<i>Objectifs :</i> <ul style="list-style-type: none">• Présenter une trajectoire de décarbonation du système énergétique global, qui s'appuie en grande partie sur le déploiement des énergies renouvelables.• Informer les décideurs sur les solutions possibles pour la mise en œuvre de l'objectif climatique fixé par l'Accord de Paris.
BP - Scénario Rapid Transition	British Petroleum (BP) est une compagnie pétrolière historique d'origine britannique.	2018	Annuelle	<i>Objectifs :</i> <ul style="list-style-type: none">• Explorer les évolutions du système énergétique compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris.• Informer les stratégies du groupe pétrolier.
Scénario Low Energy Demand (LED)	Le scénario a été créé par un groupe de chercheurs associé à l' Institut international d'analyse de systèmes appliqués (IIASA) . Cet Institut de recherche conduit des études pour analyser des enjeux d'envergure mondiale tel que le dérèglement climatique. Ses études ont pour objectif d'aider les décideurs à mettre en place des politiques basées sur la recherche scientifique.	2018	---	<i>Objectifs :</i> <ul style="list-style-type: none">• Présenter un scénario de transition basé sur la forte diminution de la demande en énergie finale qui se démarque de la plupart des scénarios proposant des solutions relatives à l'offre et la production d'énergie (décarbonation du mix énergétique, développement de grands projets renouvelables).• Informer les décideurs, montrer qu'un tel futur n'est pas irréaliste et ce qu'il implique.

ÉTAPE 2

IDENTIFIER LE NIVEAU D'INFORMATIONS DISPONIBLES SUR LE SCÉNARIO

	Support du scénario	Existence d'annexes méthodologiques et/ou de tableaux de données	Horizon temporel	Périmètre géographique et sectoriel et GES considérés	Granularité des résultats ^a		
					Pas de temps	Granularité géographique	Granularité sectorielle
AIE - Scénario SDS	Scénario publié dans le World Energy Outlook (WEO), rapport de plusieurs centaines de pages.	Une annexe méthodologique décrit le modèle, des tableaux d'hypothèses et de résultats sont donnés à la fin du rapport et sont téléchargeables sous format excel sur le site de l'AIE.	De 2017 à 2040	<i>Périmètre géographique :</i> monde <i>Périmètre sectoriel :</i> le système énergétique <i>GES :</i> Emissions de CO ₂ liées à l'énergie.	La plupart des résultats sont donnés par pas de 5 ans.	La plupart des résultats sont donnés pour les zones géographiques suivantes : Le monde, l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et du Sud, l'Europe, l'Afrique, le Moyen-Orient, l'Eurasie et l'Asie-Pacifique. Certains résultats sont donnés pour des pays individuels ou des groupes de pays, par exemple l'Union Européenne (UE).	Les résultats sont donnés pour l'industrie, le transport, les bâtiments et la production d'électricité et de chaleur.
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	Scénario publié dans le rapport <i>Energy [R]evolution : a sustainable future for all</i> , rapport détaillé de plusieurs centaines de pages. NB : dans le résumé exécutif, le scénario est appelé « Energy Revolution ».	Il n'existe pas d'annexe, toutes les informations sont dans la version longue du rapport, dont des tableaux de résultats à la fin du rapport.	De 2012 à 2050	<i>Périmètre géographique :</i> monde <i>Périmètre sectoriel :</i> le système énergétique <i>GES :</i> Emissions de CO ₂ liées à l'énergie.	La plupart des résultats sont donnés par pas de 10 ans.	La plupart des résultats sont donnés pour les zones géographiques suivantes : le monde, l'Europe OCDE, l'Amérique du Nord OCDE, l'Europe de l'Est + l'Eurasia, l'Amérique latine, l'Afrique, le Moyen Orient, la Chine, l'Inde, et les autres pays d'Asie.	Les résultats sont généralement donnés pour l'industrie, le transport et la production d'électricité et de chaleur.
IRENA - Scénario REmap	Scénario publié dans l'édition 2019 du <i>rapport Global Energy Transformation : A roadmap to 2050</i> , rapport d'une cinquantaine de pages.	Des éléments de méthodologie et des données sur le scénario (téléchargeables en format excel) sont disponibles sur le site de l'IRENA.	De 2018 à 2050	<i>Périmètre géographique :</i> monde <i>Périmètre sectoriel :</i> le système énergétique <i>GES :</i> Emissions de CO ₂ liées à l'énergie.	Les résultats sont donnés par pas de 10 ans.	Les résultats décrits par le scénario sont pour le monde – les résultats téléchargeables sous format excel sont donnés par zones géographiques (Amérique du Nord, Amérique latine, UE28, Reste de l'Europe, Afrique subsaharienne, Moyen-Orient et Afrique du Nord, Asie de l'Est, Asie du Sud Est, Reste de l'Asie).	Les résultats sont donnés pour l'industrie, le transport, les bâtiments et la production d'électricité et le chauffage urbain.

a. La désagrégation présentée ici correspond à celle des résultats donnés dans le rapport principal. Elle ne présage pas de la granularité du modèle utilisé pour quantifier le scénario, et donc de l'existence de résultats plus fins. Par exemple, le modèle de l'AIE utilisé pour le SDS a un pas de temps annuel et découpe le monde en 25 zones géographiques.

ÉTAPE 2

IDENTIFIER LE NIVEAU D'INFORMATIONS DISPONIBLES SUR LE SCÉNARIO (SUITE)

	Support du scénario	Existence d'annexes méthodologiques et/ou de tableaux de données	Horizon temporel	Périmètre géographique et sectoriel et GES considérés	Granularité des résultats ^a		
					Pas de temps	Granularité géographique	Granularité sectorielle
BP - Scénario Rapid Transition	Scénario publié dans l'Energy outlook 2019, rapport d'environ 70 pages incluant de nombreux graphiques.	Des tableaux de données sont disponibles à la fin du rapport (en Annexe) et en version excel téléchargeables sur le site de BP.	De 2017 à 2040	<i>Périmètre géographique :</i> monde <i>Périmètre sectoriel :</i> le système énergétique <i>GES :</i> Emissions de CO ₂ liées à l'énergie.	Les résultats dans le scénario sont donnés pour 2040 ou en pourcentage de changement par année entre 2017 et 2040.	Les résultats sont en majorité pour le monde, certains résultats sont donnés par zone géographique (USA, UE, autres pays de l'OCDE, la Chine, l'Inde, le reste de l'Aise, le Moyen Orient, la Russie, le Brésil, les autres pays non OCDE).	Les résultats concernant la consommation d'énergie finale données par secteur : industrie, bâtiment, transport.
Scénario Low Energy Demand (LED)	Le scénario est accessible en ligne sous forme d'un article publié dans « Nature » d'une dizaine de pages composé d'un tableau synthétisant les principales hypothèses et résultats du scénario.	Le scénario s'accompagne d'un rapport complémentaire détaillé et d'une base de données conséquente accessible en ligne (inscription gratuite).	De 2020 à 2050 (avec une prolongation jusqu'à 2100)	<i>Périmètre géographique :</i> monde <i>Périmètre sectoriel :</i> le système énergétique, l'industrie, le secteur des terres et des forêts, les déchets. <i>GES :</i> Emissions de l'ensemble des GES.	Le pas de temps est généralement de 10 ans (notamment pour les résultats de la base de données).	Les résultats sont donnés pour le monde, le Nord et le Sud.	Les données sur l'énergie sont par secteur (bâtiment résidentiel et commercial, industrie, transport et production d'électricité). Les données sur les émissions de GES sont par secteur plus agrégé (énergie et processus industriel, déchets, secteur d'utilisation des terres et forêts).

a. La désagrégation présentée ici correspond à celle des résultats donnés dans le rapport principal. Elle ne présage pas de la granularité du modèle utilisé pour quantifier le scénario, et donc de l'existence de résultats plus fins. Par exemple, le modèle de l'AIE utilisé pour le SDS a un pas de temps annuel et découpe le monde en 25 zones géographiques.

ÉTAPE 3

COMPRENDRE DANS QUEL CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE A LIEU LA TRANSITION
DÉCRITE PAR LE SCÉNARIO

	Scénario de référence	Croissance économique (calculée à partir du PIB en PPA) ^a	Evolution de la po- pulation	Autre(s) évolution(s)
AIE - Scénario SDS	Oui - le New Policies Scenario (NPS) . Scénario central du WEO, il décrit l'évolution des marchés énergétiques en prenant en compte les politiques climatiques déjà mises en place et celles prévues par les Etats. Les émissions continuent d'augmenter dans ce scénario.	Taux de croissance annuel moyen de 3,4% entre 2017 et 2040. Elle est tirée par la Chine, l'Inde, l'Asie du Sud Est et l'Afrique. Elle est moins élevée en UE (1,6 %/an en moyenne).	9,2 mds en 2040	Taux d'urbanisation en hausse partout, notamment en Asie du Pacifique et en Afrique. Peu d'éléments sur les évolutions socio-économiques autres que la croissance économique et la population.
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	Oui - appelé Reference scenario, il est basé sur le Current Policies Scenario (CPS) présenté dans le WEO 2014 par l'AIE. Scénario tendanciel, il inclut seulement les politiques climatiques et énergétiques déjà mises en place.	Taux de croissance annuel moyen de 3,1% entre 2017 et 2040. La croissance est tirée par la Chine, l'Inde et les autres pays en développement. On observe une diminution du poids économique de l'OCDE.	9,5 mds en 2050	Peu d'éléments sur les évolutions socio-économiques autres que la croissance économique et la population.
IRENA - Scénario REmap	Oui - appelé le Reference Case . Il intègre les politiques énergétiques et climatiques en place ou prévues dans chaque pays, notamment les contributions déterminées au niveau national dans le cadre de l'Accord de Paris qui ont été traduites dans les politiques nationales.	Dans le scénario de référence ^b : Taux de croissance annuel moyen de 2,4 % entre 2019 et 2050. Taux de croissance annuel moyen intégrant certains impacts climatiques sur l'économie : 1,8 % entre 2019 et 2050.	9,7 mds en 2050	Peu d'éléments sur les évolutions socio-économiques autres que la croissance économique et la population.
BP - Scénario Rapid Transition	Oui - appelé Evolving Transition (ET) . Scénario central de l'Energy Outlook, il suppose que les politiques, la technologie et les préférences sociales continuent d'évoluer de manière similaire aux dernières années. Les émissions continuent d'augmenter dans ce scénario.	Taux de croissance annuel moyen de 3,2 % entre 2017 et 2040.	9,2 mds en 2040	Peu d'éléments sur les évolutions socio-économiques autres que la croissance économique et la population.
Scénario Low Energy Demand (LED)	Non – les paramètres quantifiés décrivant le contexte socio-économique, notamment la population et la croissance économique, sont accessibles dans la base de données du scénario.	Taux de croissance annuel moyen de 2,8 % entre 2020 et 2050.	9,2 mds en 2050	Cinq évolutions majeures : l'amélioration de la qualité de vie, l'urbanisation rapide, le développement de services énergétiques nouveaux et innovants, un rôle plus actif joué par les consommateurs d'énergie, et la forte innovation dans les technologies de l'information et la communication.

a. Dans tous ces scénarios – sauf le scénario Remap de IRENA –, le PIB est une donnée exogène : il n'intègre donc ni les effets de la transition ni les impacts du changement climatique. Le scénario REmap donne quant à lui une valeur de la croissance économique intégrant certains impacts climatiques.

b. Le taux de croissance dans le scénario de transition REmap est donné à l'étape 8, qui présente les effets macroéconomiques de la transition.

ÉTAPE 4

IDENTIFIER L'OBJECTIF CLIMATIQUE ET LA RÉPARTITION DES EFFORTS DANS LE TEMPS

	Objectif climatique visé et probabilité associée à cet objectif	Prise en compte de l'objectif climatique	Evolution de la trajectoire des GES (cf. Figure 15)	Hypothèses concernant l'évolution des émissions de GES au-delà de la période couverte par le scénario
AIE - Scénario SDS	Compatibilité avec l'Accord de Paris.	La trajectoire d'émissions de CO ₂ jusqu'en 2040 se trouve dans l'enveloppe des trajectoires des scénarios de transition du monde de la recherche compatibles avec le RCP2.6 ^a . L'AIE renvoie à la base de données https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/ .	Le pic des émissions de CO ₂ liées à l'énergie a lieu en 2020 et diminuent jusqu'à 17,6 GtCO₂ en 2040 .	La poursuite du rythme de réduction des émissions au-delà de 2040 permettrait d'atteindre zéro émission nette pour les émissions de CO ₂ liées à l'énergie vers 2070. Il est précisé que ce maintien du rythme de réduction nécessiterait une forte innovation technologique , en particulier concernant le CCUS et les techniques d'émissions négatives .
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	En dessous de 2°C.	Le respect de l'objectif climatique est justifié par la trajectoire d'émissions du scénario qui atteint zéro émission en 2050 liée à l'énergie.	Le pic des émissions de CO ₂ liées à l'énergie a lieu avant 2020 - les émissions diminuent drastiquement pour atteindre zéro émission en 2050 .	----
IRENA - Scénario REmap	Bien en dessous de 2°C.	Les émissions de CO ₂ cumulées entre 2015 et 2050 sont inférieures au budget carbone permettant de limiter avec une probabilité de 67 % le réchauffement climatique global à 2°C. Des hypothèses sont prises sur l'évolution des émissions non-couvertes par le scénario (cf. étape 6).	Le pic des émissions de CO ₂ liées à l'énergie a lieu avant 2020 - les émissions diminuent drastiquement pour atteindre 9,8 GtCO₂ en 2050 .	---
BP - Scénario Rapid Transition	Compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris.	La trajectoire d'émissions du scénario se situe dans l'enveloppe des trajectoires de 4 autres scénarios se décrivant comme compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris (le SDS de l'AIE, le scénario Sky de Shell, le scénario Renewal d'Equinor, et la trajectoire illustrative P1 du rapport spécial 1,5°C du GIEC).	Le pic des émissions de CO ₂ liées à l'énergie a lieu avant 2020 puis les émissions diminuent de manière régulière, jusqu'à atteindre 18 GtCO₂ en 2040 .	Le scénario cite des évolutions nécessaires pour réduire les émissions restantes après 2040. Il s'agit par exemple du recours au CCUS et aux émissions négatives (BECCS), d'une plus large électrification dans l'utilisation finale de l'énergie, de l'amélioration des technologies de stockage de l'énergie, du recours à l'hydrogène et aux bioénergies.
Scénario Low Energy Demand (LED)	1,5°C sans dépassement avec une probabilité de plus de 60 %.	Un module climatique (MAGICC) est utilisé pour estimer le degré de réchauffement global. De plus, le modèle utilisé pour la construction du scénario est contraint par un budget carbone 2020-2100 de 390 GtCO₂ .	Le pic des émissions de GES a lieu en 2020, puis les émissions diminuent fortement pour atteindre 9,4 GtCO₂eq en 2050 . Les émissions de CO ₂ atteignent 2,7 GtCO₂ en 2050 , et sont négatives à partir de 2060.	Le scénario est prolongé de manière stylisée (avec des hypothèses simplifiées) jusqu'en 2100.

a. Ces scénarios explorent les combinaisons entre différents narratifs socio-économiques (les SSP) et différents forçages radiatifs représentés par les RCP (cf. Box 12 et Box 7).

ÉTAPE 5

IDENTIFIER LE POIDS DONNÉ AUX DIFFÉRENTS LEVIERS DE LA TRANSITION
ET LES HYPOTHÈSES ASSOCIÉES

	Levier politique	Levier technologique	Levier comportemental
AIE - Scénario SDS	<ul style="list-style-type: none"> • Nombreuses politiques mises en place dans tous les secteurs et dans tous les pays, ex. : fin des subventions aux énergies fossiles d'ici 2035 pour tous les pays, instauration de standards d'efficacité et d'émissions strictes pour les centrales et les industries, les véhicules et les bâtiments neufs. <p><i>Focus sur le prix du carbone :</i></p> <p>Le prix du carbone correspond à une hypothèse d'entrée, et représente la mise en œuvre de politiques de tarification du carbone (taxes ou marchés), en complément d'autres mesures.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour les pays développés : de 63 \$/tonne en 2025 à 140 \$/tonne en 2040 ; • Pour certains pays émergents : de 43 \$/tonne en 2025 à 125 \$/tonne en 2040. 	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès technologique soutenu par le levier politique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu ou pas évoqué.
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	<ul style="list-style-type: none"> • Engagements internationaux forts de la part des Etats, avec des objectifs ambitieux et légalement contraignants. • Mise en place de politiques climatiques et énergétiques ambitieuses dans tous les secteurs, ex. : fin des subventions aux énergies fossiles d'ici 2020 ; • Forte acceptabilité politique et sociale pour les énergies renouvelables mais pas pour les technologies comportant des enjeux de durabilité environnementale et sociale : sortie du nucléaire et non recours aux technologies BECCS/CCUS. <p><i>Focus sur le prix du carbone :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - La tarification du carbone est recommandée comme mesure politique, mais le prix du carbone n'est pas précisé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès technologique rapide et soutenu par le levier politique, notamment pour les technologies renouvelables aujourd'hui peu ou non matures (ex. : l'hydrogène pour les véhicules, l'éolien flottant (offshore), les technologies d'énergie marine) et les technologies de réseaux permettant d'intégrer une part élevée de renouvelables dans le mix électrique (ex. : technologies de réseaux intelligents, de gestion de la demande). 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu ou pas évoqué.
IRENA - Scénario Remap	<ul style="list-style-type: none"> • Instauration de mesures d'atténuation sectorielles (ex. : instauration d'un standard minimum d'émissions pour les véhicules, interdiction de construire de nouvelles centrales à charbon). • Instauration de politiques permettant de mettre en place un cadre économique favorable au déploiement rapide et à grande échelle des énergies renouvelables (ex. : politique de réglementation des prix, nouvelles structures des tarifs pour l'électricité). <p><i>Focus sur le prix du carbone :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Instauration de mécanismes de tarification du carbone dans le domaine de l'industrie, de l'aviation, et du transport maritime et routier de longue distance : la valeur du carbone n'est cependant pas précisée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès technologique rapide et soutenu par le levier politique, permettant par exemple d'améliorer la digitalisation et la flexibilité du système électrique, d'augmenter l'utilisation de l'hydrogène pour les transports et l'industrie, ou encore le recours aux bio-carburants dans l'aviation, le transport maritime et le transport routier de longue distance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu ou pas évoqué.
BP - Scénario Rapid Transition	<ul style="list-style-type: none"> • Instauration de politiques et mesures sectorielles (ex. : l'interdiction d'installer de nouvelle centrale à charbon conventionnelle au niveau mondial à partir de 2030, l'instauration de standards d'émissions stricts pour les appareils électriques et les bâtiments neufs). • Instauration de mécanismes de tarification du carbone. <p><i>Focus sur le prix du carbone :</i></p> <p>Le prix du carbone correspond à une hypothèse d'entrée, et représente la mise en œuvre de politiques de tarification du carbone (taxes ou marchés) dans les différents pays :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pour les pays de l'OCDE : de 25 \$/tonne en 2025 à 200 \$/tonne en 2040, - Pour les pays hors OCDE : de 10 \$/tonne en 2025 à 100 \$/tonne en 2040. 	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès technologique continu dans le domaine des énergies renouvelables et de la captation et du stockage du CO₂. • Le progrès technologique est stimulé et soutenu par différentes politiques – seul, il ne permettra pas de diminuer suffisamment les émissions. 	<ul style="list-style-type: none"> • A la marge, certains changements de comportements et de pratiques, liés notamment à l'économie circulaire et à la mobilité.

ÉTAPE 5

IDENTIFIER LE POIDS DONNÉ AUX DIFFÉRENTS LEVIERS DE LA TRANSITION
ET LES HYPOTHÈSES ASSOCIÉES (SUITE)

	Levier politique	Levier technologique	Levier comportemental
Scénario Low Energy Demand (LED)	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place de politiques publiques pour accompagner et accélérer les changements technologiques, institutionnels (notamment des marchés) et comportementaux qui sont présentés comme les principaux moteurs de la transition. <p><i>Focus sur le prix du carbone :</i></p> <p>Prix fictif du carbone au niveau mondial représentant le coût des réductions d'émissions nécessaires pour atteindre l'objectif climatique de : 90 \$/tCO₂ en 2030, passant à 160 \$/tCO₂ d'ici 2050, puis à environ 700 \$/tCO₂ d'ici 2100.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Progrès rapide des technologies de l'information et de la communication couplé à une forte digitalisation. Rapide innovation et amélioration dans la production d'énergie décentralisée et à petite échelle, développement de technologies liées à l'utilisation finale de l'énergie. Non développement des technologies CCUS et BECCS. 	<ul style="list-style-type: none"> Aspirations fortes à vivre dans un environnement sain et non-pollué. Evolutions des préférences des consommateurs pour des services innovants, flexibles, et disponibles à la demande (ex. : objets et services partagés). Changement du rôle des consommateurs d'énergie qui prennent une part active dans la production d'énergie (ex. : développement de l'autoconsommation à l'échelle d'un foyer ou d'un quartier).

ÉTAPE 6

ANALYSER LES RÉPARTITIONS GÉOGRAPHIQUE ET SECTORIELLE DES EFFORTS DE RÉDUCTION

	Répartition entre secteurs (cf. Figure 16)	Hypothèses sur les secteurs/gaz non représentés	Répartition entre pays/zones
AIE - Scénario SDS	La réduction des émissions vient avant tout du secteur de production d'électricité, puis du secteur des transports. Légère réduction dans les autres secteurs.	Les émissions de CO ₂ liées aux procédés industriels et les émissions de méthane liées aux procédés industriels et à l'énergie atteignent 2,4 GtCO ₂ eq en 2040. Les projections d'émissions du secteur UTCATF ^a sont tirées du Baseline Scenario (2012b) de l'OCDE - elles déclinent dans le temps.	L'effort de réduction des émissions est plus important pour les pays développés (- 4,5 %/an en moyenne pour les pays de l'OCDE) que pour les pays en développement (-2 %/an), avec quelques exceptions comme la Chine (- 4,3 %/an).
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	Tous les secteurs atteignent zéro émission en 2050. Les émissions du secteur de production de l'électricité diminuent fortement dès 2020 ; pour les autres secteurs, la diminution est plus lente jusqu'en 2030 puis très soutenue entre 2030 et 2050.	---	Tous les pays atteignent zéro émission en 2050, cependant, les pays développés et l'Amérique latine ont un rythme de diminution plus élevé sur la période 2015-2040 que les pays en développement, en particulier les pays asiatiques dont la Chine et l'Inde - les émissions de cette dernière continuent d'augmenter jusqu'en 2030.
IRENA - Scénario REmap	Le secteur de production de l'électricité réalise les efforts de réduction les plus importants. Le secteur des transports est aussi fortement sollicité.	<ul style="list-style-type: none"> Hypothèses pour les émissions de CO₂ des procédés industriels : 90 GtCO₂ d'émissions cumulées entre 2015 et 2050. Hypothèses pour les émissions de CO₂ du secteur UTCATF^a : les émissions cumulées du secteur entre 2015-2100 sont proches de zéro (positives avant 2050, nulles en 2050 puis négatives après 2050). 	L'Amérique du Nord, l'Union européenne et l'Asie de l'Est font les plus importants efforts de réduction (environ - 80 % entre 2016 et 2040). Les autres pays ont un rythme de réduction moins rapide, en particulier le reste de l'Asie dont les émissions diminuent d'environ 45 % entre 2016 et 2040.
BP - Scénario Rapid Transition	Le secteur de production de l'électricité réalise les efforts de réduction les plus importants. Les émissions de l'industrie diminuent également de manière significative, alors que celles des transports ne diminuent que faiblement.	---	---
Scénario Low Energy Demand (LED)	L'ensemble des secteurs est à zéro émission nette à l'horizon 2060. Les émissions négatives proviennent du secteur UTCATF ^a - pas de recours au BECCS.	L'évolution de l'ensemble des GES est décrite dans la base de données du scénario.	Les pays du Sud et du Nord atteignent la neutralité carbone à l'horizon 2060.

a. UTCATF : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie

ÉTAPE 7

IDENTIFIER LES SOLUTIONS DÉPLOYÉES POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GES ET LES TECHNOLOGIES ASSOCIÉES

Principales solutions bas-carbone mobilisées (Illustration graphique des solutions déployées aux [Figure 17](#), [Figure 18](#), [Figure 19](#), [Figure 20](#))

AIE - Scénario SDS	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de l'efficacité énergétique. • Développement des énergies renouvelables. • Développement du nucléaire, des technologies CCUS. • Réduction des émissions de méthane dans la production de pétrole et de gaz ("upstream").
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de l'efficacité énergétique. • Développement des énergies renouvelables, notamment solaire et éolien. • Electrification dans tous les secteurs. • Décarbonation des combustibles non électriques via le recours à l'hydrogène et aux bio-combustibles pour les transports. • Décarbonation de la production de chaleur notamment via le déploiement de la géothermie, de l'utilisation de biomasse et des capteurs solaires thermiques. • Choix de non-recours au CCUS et de sortie du nucléaire.
IRENA - Scénario REmap	<ul style="list-style-type: none"> • Electrification de la production de chaleur et du secteur des transports. • Déploiement des énergies renouvelables pour la production d'électricité et pour des usages directs/finaux (solaire thermique, géothermie, biomasse). • Efficacité énergétique (relativement moins importante par rapport aux deux premières solutions). • Déploiement de CCUS considéré pour certaines industries émettrices (hors production d'électricité) mais montant de CO₂ capturé non précisé.
BP - Scénario Rapid Transition	<ul style="list-style-type: none"> • Décarbonation du mix énergétique via le développement des énergies renouvelables, l'électrification et le déploiement des technologies CCUS. • Des gains d'efficacité énergétique, qui ne permettent pas de contrebalancer l'augmentation de la demande en services énergétiques : la demande en énergie continue donc d'augmenter jusqu'en 2040.
Scénario Low Energy Demand (LED)	<ul style="list-style-type: none"> • Baisse drastique de la demande en énergie grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les usages finaux de l'énergie et le développement de services énergétiques innovants. • Electrification des usages de l'énergie. • Décarbonation et décentralisation de la production d'énergie grâce au développement d'énergies renouvelables, variables et flexibles. • Choix de non-recours au CCUS.

ÉTAPE 8

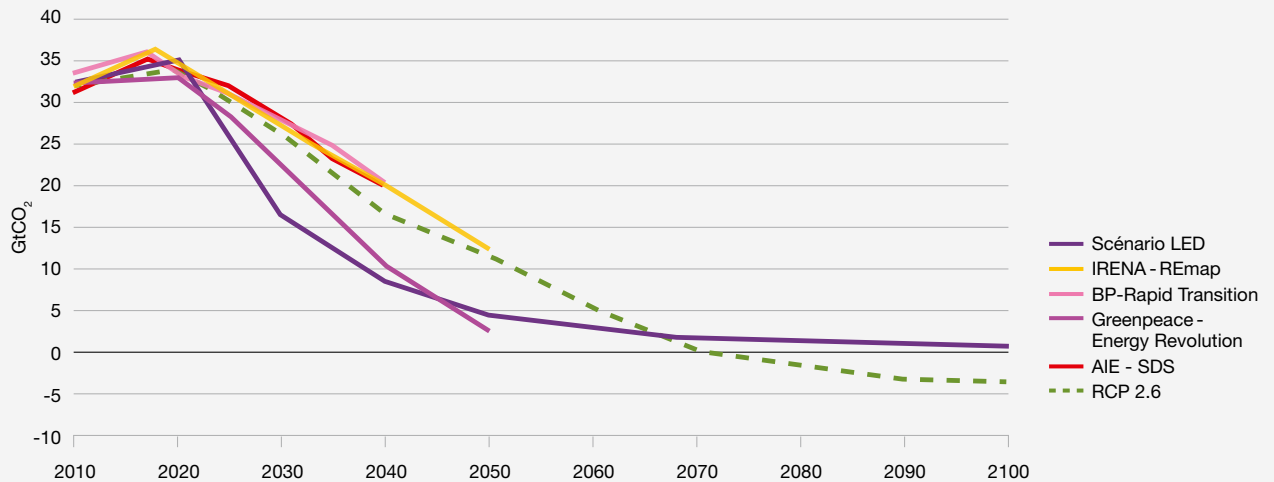
IDENTIFIER LES CONSÉQUENCES MACRO-ÉCONOMIQUES DE LA TRANSITION

	Investissements nécessaires	Impacts de la transition sur le PIB	Impacts de la transition sur l'emploi	Prix des énergies et de l'électricité pour les consommateurs finaux	Prix des combustibles fossiles
AIE - Scénario SDS	67 713 mds\$ d'investissements cumulés dans le système énergétique (approvisionnement et utilisation d'énergie) entre 2018 et 2040 – ils sont de 60 042 mds\$ pour le New Policies Scenario.	---	---	Les prix de l'électricité pour le consommateur final sont donnés pour certaines régions. Ex. : le prix de l'électricité passe d'environ 85 \$/MWh en 2017 à 120 \$ MWh en 2040 en Chine, d'environ 130 à 165 \$/MWh aux Etats-Unis et d'environ 230 à 260 \$/MWh dans l'UE.	Les prix des combustibles fossiles sont endogènes au scénario. Prix du pétrole : 74 \$/baril en 2025 et 64 \$/baril en 2040. Les prix du gaz et du charbon varient selon les régions. Ex. : prix du gaz en UE : 7,7 \$/MBtu en 2040 ; prix du charbon en UE : 66 \$/tonne en 2040.
Greenpeace - Scénario Advanced Energy Revolution	Sur la période 2012-2050 : 64 600 mds\$ d'investissements cumulés dans le système électrique (1 656 mds \$/an en moy.) + 16 730 mds\$ d'investissements cumulés pour la production de chaleur (429 milliards \$/an en moy.).	---	Impact positif sur l'emploi dans le secteur de l'énergie : le scénario résulte sur plus d'emplois dans le secteur de l'énergie à chaque période par rapport au scénario de référence. Par exemple, en 2030, il y a 48 millions d'emplois dans le secteur de l'énergie pour le scénario Advanced Energy Revolution et 28 millions dans le scénario de référence.	Les prix pour les consommateurs finaux ne sont pas donnés mais les coûts de production de l'électricité sont donnés pour différentes régions du monde. Par exemple, en UE, le coût de production de l'électricité augmente jusqu'en 2030 pour atteindre presque 10 cts\$/kWh puis diminue pour atteindre environ 8 cts\$/kWh en 2050.	Les prix des combustibles fossiles sont des hypothèses d'entrée. Prix du pétrole : 103,5 \$/baril en 2025 et 100 \$/baril en 2040. Prix du gaz et du charbon varient selon les régions. Ex. : prix du gaz en Europe : 9,7 \$/GJ en 2040 ; prix du charbon pour les pays de l'OCDE : 3,3 \$/GJ en 2040.
IRENA - Scénario REmap	110 000 mds\$ d'investissements cumulés dans le système énergétique sur la période 2016-2050. En comparaison, le besoin d'investissements cumulés pour le scénario de référence sur la même période est de 95 000 mds\$.	Impact positif sur le PIB : le taux de croissance annuel entre 2019 et 2050 est de 2.4% dans le scénario de référence et de 2.5% dans le scénario REmap (respectivement 1,8 % et 2% en prenant en compte certains impacts climatiques).	Impact positif de la transition sur l'emploi dans le secteur de l'énergie : les nouveaux emplois liés à la transition dépassent largement les emplois perdus dans le secteur des combustibles fossiles ^a . Impact relativement insignifiant de la transition sur l'emploi au niveau de l'économie globale.	---	Les prix des combustibles fossiles ne sont pas donnés – il est seulement précisé qu'ils sont « tirés d'études nationales ou de sources reconnues (comme l'AIE) ».
BP - Scénario Rapid Transition	---	---	---	---	---
Scénario Low Energy Demand (LED)	Les investissements dans l'approvisionnement énergétique sont estimés à un peu plus de 1 000 mds\$ par an entre 2020 et 2050 (1 170 milliards en 2020 et 1 053 milliards en 2050).	---	---	---	---

a. Plusieurs études de l'IRENA évaluent les impacts de la transition sur l'emploi dans le secteur énergétique, notamment l'étude *Perspectives for the energy transition: Investment needs for a low-carbon energy system*, IRENA et IEA, 2017.

3. HUIT ÉTAPES POUR DÉCRYPTER SCÉNARIOS DE TRANSITION

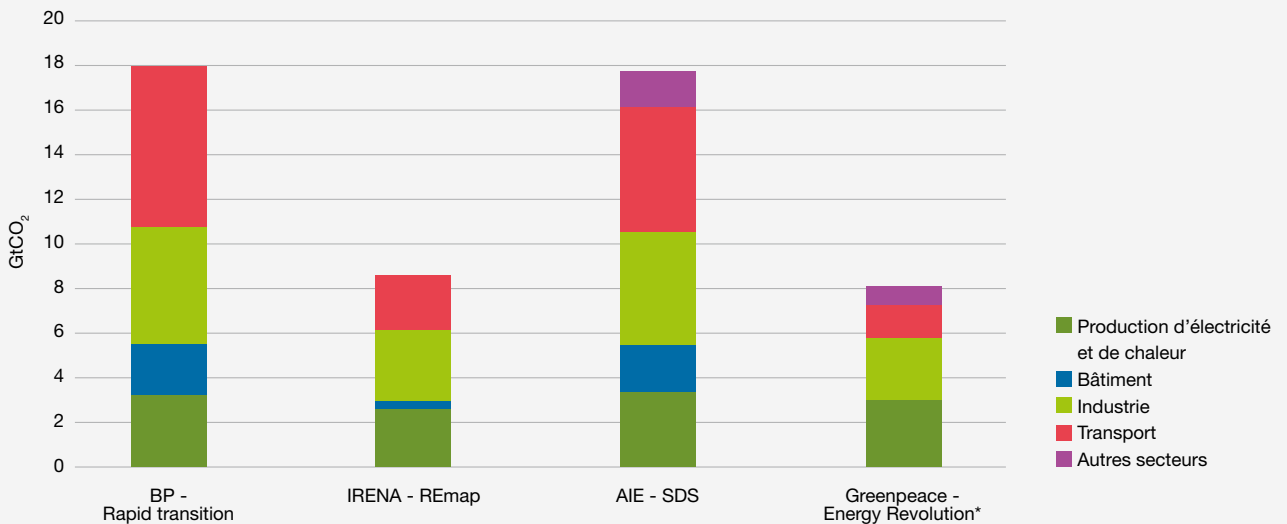
FIGURE 15. TRAJECTOIRES D'ÉMISSIONS DE CO₂ LIÉES À L'ÉNERGIE ET AUX PROCÉDÉS INDUSTRIELS SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE TRANSITION



Source : I4CE, 2019.

* Le périmètre des émissions de certains scénarios sélectionnés n'inclut pas les émissions de CO₂ liées aux procédés industriels. Pour permettre la comparaison visuelle des trajectoires d'émissions entre les différents scénarios, un montant annuel de 2,6 GtCO₂ a été ajouté aux émissions des scénarios n'incluant pas les procédés industriels – c'est-à-dire les scénarios SDS de l'AIE, Rapid Transition de BP, REmap de l'IRENA et Advanced Energy Revolution de Greenpeace. Le montant de 2,6 GtCO₂ correspond aux émissions actuelles de CO₂ liées aux procédés industriels (Fischelick, 2014), et est compatible avec les informations sur ces émissions tirées des scénarios SDS de l'AIE (par lecture visuelle) et REmap de l'IRENA (qui donne le montant des émissions liées aux procédés industriels cumulées jusqu'en 2050).

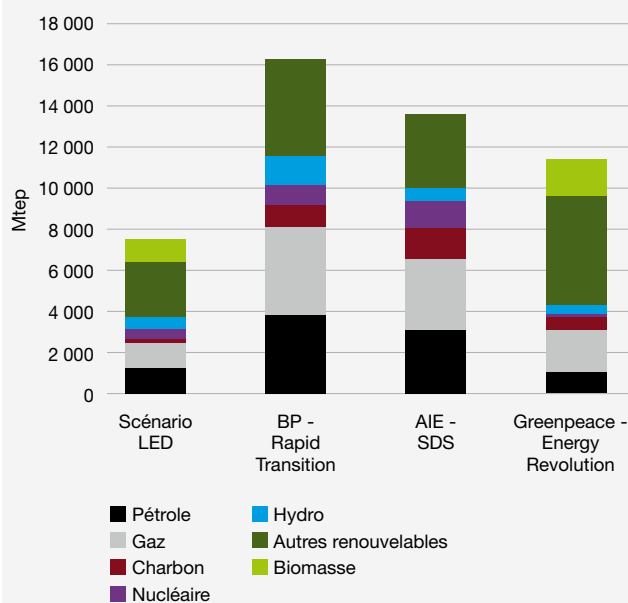
FIGURE 16. ÉMISSIONS DE CO₂ LIÉES À L'ÉNERGIE PAR SECTEUR EN 2040 SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE TRANSITION



Source : I4CE, 2019.

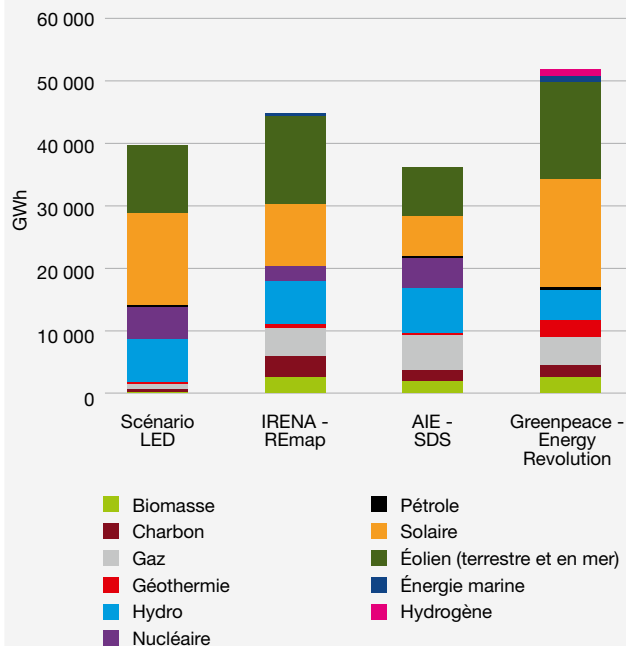
* Les émissions du secteur « Bâtiment » du scénario de Greenpeace – Advanced Energy Revolution ne sont pas nulles en 2040, elles sont comptées dans « Autres secteurs ».

**FIGURE 17. ÉNERGIE PRIMAIRE
PAR SOURCE EN 2040 SELON DIFFÉRENTS
SCÉNARIOS DE TRANSITION**



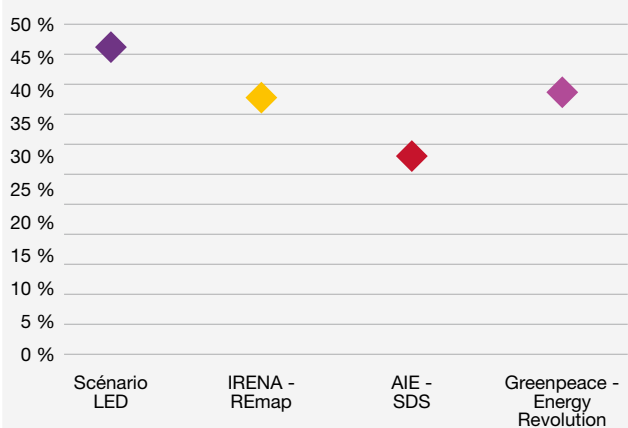
Source : I4CE, 2019.

**FIGURE 18. PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ
PAR SOURCE EN 2040 SELON DIFFÉRENTS
SCÉNARIOS DE TRANSITION**



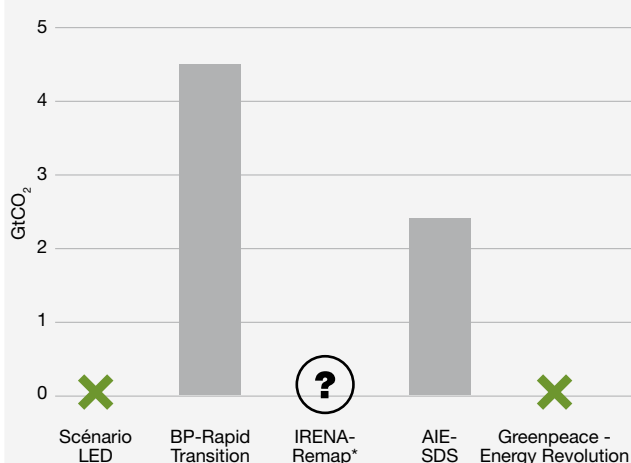
Source : I4CE, 2019.

**FIGURE 19. PART DE L'ÉLECTRICITÉ DANS
LA CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE EN 2040
SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE TRANSITION**



Source : I4CE, 2019.

**FIGURE 20. MONTANT DE CO₂ CAPTURÉ
PAR CCUS EN 2040 SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS
DE TRANSITION**



Source : I4CE, 2019.

* Pour le scénario REmap de l'IRENA, le montant de CCUS n'est pas indiqué. Cependant, il est précisé que les technologies CCUS ont été considérées au niveau mondial pour trois principales industries émettrices : la sidérurgie, le ciment et la production chimique/pétrochimique – mais pas pour la production d'électricité.

Conclusion

La transition vers une économie bas-carbone induit des risques et opportunités pour les acteurs économiques que ceux-ci doivent anticiper pour construire au mieux leur stratégie face à un contexte d'incertitudes. Dans ce cadre, **l'utilisation de scénarios – qui sont des représentations plausibles de situations futures incertaines – est très utile pour mieux comprendre les enjeux à moyen et long terme de la transition bas-carbone.** Avant d'utiliser des scénarios, il est essentiel de bien savoir les interpréter. Cela requiert d'une part de se repérer dans l'écosystème complexe des scénarios liés au climat et d'identifier ceux qui permettent d'explorer les questions liées à la transition bas-carbone – les scénarios de transition. Cela nécessite d'autre part de bien comprendre les enjeux de ces derniers. En effet, il existe une grande diversité de scénarios de transition, qui explorent des visions contrastées de la transition, et répondent à des objectifs différents. Les choix effectués à chaque étape de construction – les hypothèses d'entrée, l'utilisation d'un modèle – conditionnent les résultats des scénarios, et ne sont pas toujours explicites.

Pour appréhender les enjeux d'un scénario, il est donc essentiel de décrypter ces différents éléments. Une grille de lecture des scénarios de transition a été mise au point, et propose huit étapes pour bien les interpréter. A titre d'illustration, elle est appliquée à cinq scénarios : le SDS de l'AIE, le scénario Advanced Energy Revolution de Greenpeace, le scénario LED de IIASA, le scénario Rapid Transition de British Petroleum et le scénario REmap de l'IRENA.

Cette publication s'inscrit dans un projet plus large portant sur l'utilisation des scénarios liés au climat par les acteurs économiques pour analyser les risques et les opportunités liés à la transition vers une économie bas-carbone. Dans ce cadre, la mise au point d'un guide par étapes pour aider les entreprises à réaliser une analyse de risques et d'opportunités liés à la transition à partir de scénarios est en cours. Ce guide inclura également des recommandations sur les informations utiles à transmettre aux acteurs financiers sur la base de l'analyse de scénarios et des exemples de bonnes pratiques de reporting.

Glossaire et liens utiles

Liens utiles pour aller plus loin dans la compréhension des scénarios liés au climat

- **Le guide interactif en ligne "Climate change scenario" développé par le projet Senses** : <https://www.climatescenarios.org/primer/>

Cet outil interactif décrit les scénarios qui s'intéressent aux liens entre le développement socio-économique, l'énergie, l'utilisation des sols, les émissions, le climat et ses impacts. Il définit les principaux concepts des scénarios liés au climat à l'aide de visuels interactifs.

Plus d'informations sur les RCP et les SSP

- **Base de données des RCP** : <https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/>

Cette base de données publique met à disposition un ensemble de données quantitatives décrivant les RCP et l'évolution des émissions et concentrations des différents gaz à effet de serre qui leur est associée.

- **Base de données des SSP** : <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/>

Cette base de données publique met à disposition les données sous-jacentes aux différents SSP (population, croissance économique, taux d'urbanisation). Elle fournit également les résultats des scénarios basés sur les SSP, concernant l'évolution du système énergétique (la demande en énergie, la production d'énergie par source etc.), l'évolution du système d'utilisation des sols, la trajectoire des émissions de GES, l'évolution d'indicateurs climatiques (le forçage radiatif, l'augmentation de la température), et des indicateurs économiques. A chaque SSP sont associés plusieurs scénarios, des scénarios de référence -non contraints par l'atteinte d'un objectif climatique- et des scénarios de transition, contraints par la limitation du forçage radiatif correspondant aux différents RCP. Ces scénarios ont été quantifiés grâce à plusieurs modèles d'évaluation intégrée, ce qui fournit plusieurs interprétations des SSP. Pour chaque SSP, l'interprétation d'un modèle en particulier a été sélectionnée comme « SSP marqueur ».

Plus d'informations sur les modèles utilisés pour construire les scénarios de transition

- **Base de données sur les modèles d'évaluation intégrée** : https://www.iamcdocumentation.eu/index.php/IAMC_wiki

Mise au point par le Consortium de modélisation d'évaluation intégrée (Integrated Assessment Modelling Consortium), cette base de données présente et décrit les caractéristiques de nombreux modèles intégrés utilisés pour construire les scénarios de transition – dont certains ont été évoqués dans cette publication.

- **Fiches d'identité des modèles utilisés pour construire les scénarios de transition évalués dans le rapport spécial 1,5°C du GIEC** : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_SM_Low_Res.pdf

Dans le cadre du rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement global de 1,5°C, le GIEC a combiné les fiches descriptives (reference cards) des modèles utilisés pour construire les scénarios de transition analysés dans le rapport.

- **L'article en ligne "How integrated assessment models are used to study climate change?" de Carbon Brief** : <https://www.carbonbrief.org/qa-how-integrated-assessment-models-are-used-to-study-climate-change>

Plus d'informations sur les concepts liés aux scénarios de changement climatique et d'impacts climatiques

- **Site réalisé par le Réseau Action Climat (RAC) – « Le climat change »** : <http://leclimatchange.fr/>

Ce site propose un décryptage pédagogique du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC et de ses principales conclusions.

- **Site réalisé par l'IPSL avec le soutien de l'INSU (CNRS) – « Le climat en questions »** : <http://www.climat-en-questions.fr/>

Ce site pédagogique propose des réponses aux questions les plus courantes sur le climat et son évolution, apportées par les experts scientifiques issus de plusieurs institutions reconnues. Il regroupe les questions par grandes thématiques (fonctionnement du climat, observation, évolutions actuelle et future etc.). Pour faciliter la compréhension de phénomènes parfois complexes, deux niveaux de lecture sont proposés : élémentaire et avancé.

- **Site de Météo France – « Comprendre : tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France »** : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur>

Le site de Météo-France apporte des éclairages pédagogiques sur la météo, le climat et son évolution, incluant de nombreux exemples sur le climat de la France.

- **Portail en ligne « DRIAS, les futurs du climat »** : <http://www.drias-climat.fr/>

Le portail français DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements) propose une introduction interactive aux scénarios de changement climatique et d'impacts climatiques à l'échelle de la France. Dans l'Espace Découverte, l'utilisateur du portail choisit les caractéristiques du scénario qu'il souhaite consulter (couverture géographique, variable climatique ou impact d'intérêt, hypothèses d'entrée, modèles). Dans l'Espace Données et produits, l'utilisateur peut commander gratuitement des séries de données.

- **Site de synthèse des impacts climatiques observés sur les humains « Traceable evidence of the impacts of climate change on humanity »** : <http://impact.gocarbonneutral.org/>

Associée à l'article de Mora et al. paru en 2018 dans la revue *Nature Climate Change*, cette base de données répertorie les impacts climatiques observés de 10 grandes catégories d'aléas climatiques sur 6 grands aspects de la vie humaine, et les études qui leur sont associées. Cela permet de mesurer la diversité des impacts climatiques auxquels les humains font face actuellement.

- **L'article en ligne "How do climate models work" de Carbon Brief** : <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work>

Glossaire

Général

GIEC : Le GIEC est un organe scientifique créé en 1988 par l'Organisation des Nations Unies (ONU) pour aider la communauté mondiale à mieux comprendre le changement climatique et ses enjeux. Il est chargé de synthétiser et d'évaluer à intervalles réguliers les connaissances sur le changement climatique, ses causes et ses impacts. Il publie ses travaux sous forme de rapports d'évaluation (appelés « AR » pour « Assessment Report ») et de rapports spéciaux comme le rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement global de 1,5°C paru en 2018.

Modèle : Représentation abstraite et simplifiée des caractéristiques et des mécanismes d'un système, par exemple le climat, l'économie, un pays ou une culture agricole, permettant de simuler le fonctionnement de ce système.

Modèles d'évaluation intégrée (appelé IAMs pour « Integrated Assessment Models ») : Modèles intégrés qui incluent non seulement une représentation des systèmes humains mais aussi d'importants processus physiques liés au changement climatique tel que le cycle du carbone, et parfois des impacts du changement climatique.

Risque : Conséquences éventuelles, incertaines et néfastes d'un événement sur quelque chose ayant une valeur. Le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances ou d'événements dangereux multipliée par les impacts de tels phénomènes ou tendances lorsqu'ils se produisent.

Scénario : Représentation plausible d'un futur incertain, incluant parfois la trajectoire empruntée pour arriver à ce futur, construit à partir d'hypothèses et de paramètres moteurs cohérents entre eux.

Système socio-économique : Concept large qui décrit la façon dont sont organisées les sociétés. Il inclut

un ensemble de caractéristiques démographiques, économiques, politiques, institutionnelles, sociales, culturelles et technologiques.

Transition

Modèles intégrés : Modèles servant à étudier les interactions entre plusieurs secteurs de l'économie ou plusieurs composantes d'un système particulier, tel que le système énergétique. Dans le contexte des scénarios de transition, ces modèles comprennent au moins des représentations complètes et désagrégées du système énergétique et son lien avec l'économie globale, ce qui permet d'étudier les interactions entre les différents éléments de ce système. Ils peuvent également inclure des représentations du secteur de l'économie dans son ensemble, de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et du système climatique.

Scénarios de transition publics analysés à travers la grille de lecture :

- **Scénario Advanced Energy Revolution de Greenpeace (2015) – ou "Energy Revolution"** : <https://www.greenpeace.org/canada/fr/publications/1575/revolution-energetique-2015/>

Le scénario de transition de Greenpeace présente une trajectoire visant à réduire totalement les émissions de CO₂ liées à l'énergie d'ici 2050, à atteindre un mix 100 % renouvelable et à sortir du nucléaire.

- **Scénario Low Energy Demand (LED) de A. Grubler et al. (2018) :**

- **Scénario** : <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15301/>

- **Base de données associée** : <https://db1.ene.iiasa.ac.at/LEDDB>

Mis au point par des chercheurs de l'Institut international d'analyse de systèmes appliqués (IIASA), ce scénario propose une transition permettant de respecter l'objectif climatique de 1,5°C. Il s'appuie sur une très forte réduction de la demande en énergie grâce au développement de services énergétiques innovants du côté des utilisateurs finals et le développement de systèmes de production d'énergie de petite échelle, décarbonés et décentralisés.

- **Scénario Rapid Transition (RT) de British Petroleum (BP) (2018)** : <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>

Mis au point dans le cadre de l'Energy Outlook publié annuellement par l'entreprise pétrolière BP, le scénario Rapid Transition décrit les évolutions nécessaires du système énergétique pour respecter les objectifs de l'Accord de Paris.

- **Scénario REmap de l'IRENA (2019)** : <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-The-REmap-transition-pathway>

Le scénario de transition de l'IRENA présente une trajectoire de décarbonation du système énergétique s'appuyant en grande partie sur le déploiement des énergies renouvelables et sur l'efficacité énergétique pour limiter le réchauffement climatique global bien en dessous de 2°C. Il est mis à jour depuis 2017 avec des analyses complémentaires, comme l'évaluation des impacts socio-économiques de la transition.

• **Scénario Sustainable Development (SDS) de l'AIE (2018)** : <https://www.iea.org/weo2018/scenarios/>

Le scénario de transition de l'AIE présente une trajectoire d'évolution du système énergétique qui vise le respect des trois objectifs suivants : être compatible avec l'Accord de Paris, garantir l'accès aux services énergétiques modernes et diminuer les impacts de la pollution de l'air sur la santé. Il est présenté dans la publication phare de l'AIE, le World Energy Outlook, qui analyse chaque année l'évolution et les transformations possibles des marchés énergétiques.

Changement climatique et impacts

Adaptation : Démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Pour les systèmes humains, il s'agit d'atténuer les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Pour certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences.

Aérosols : Particules solides ou liquides en suspension dans l'air qui résident dans l'atmosphère pendant au moins plusieurs heures. Elles peuvent être d'origine naturelle, provenant par exemple de l'érosion des sols par le vent, des volcans ou encore du sel marin, ou d'origine humaine, provenant par exemple de la métallurgie, de l'incinération des déchets, ou de la combustion de biomasse et de charbon.

Capacité d'adaptation : la capacité des systèmes, des institutions, des humains et d'autres organismes à s'adapter aux dommages potentiels, à profiter des opportunités ou à faire face aux conséquences. La capacité d'adaptation peut augmenter ou diminuer avec le temps selon les changements dans les ressources disponibles et les conditions du système considéré, ou selon les effets cumulés d'événements critiques plus fréquents. Un événement catastrophique peut également réduire de manière permanente la capacité d'adaptation du système si celui-ci ne peut pas récupérer ses fonctionnalités au fil du temps (c'est-à-dire une résilience limitée).

Climat : Le climat décrit les conditions météorologiques moyennes pour un endroit donné sur une longue période, généralement 20 à 30 ans. C'est une distribution statistique des conditions météorologiques auxquelles on peut s'attendre. **Changement climatique** : changement de l'état

du climat qui peut être identifié (par exemple, à l'aide de tests statistiques) par des changements dans la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une période prolongée, généralement de plusieurs décennies ou plus. Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels ou à des phénomènes externes telles que les cycles solaires, les éruptions volcaniques et des modifications d'origine humaine et persistantes de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols.

Effet de serre : Les deux tiers de l'énergie en provenance du soleil sont absorbés par l'atmosphère, les sols et l'océan (le tiers restant est directement réfléchi vers l'espace par les nuages, les aérosols, l'atmosphère et la surface terrestre). Atmosphère et surface terrestre émettent en retour un rayonnement infrarouge que les nuages et les gaz à effet de serre absorbent et retournent en grande partie vers le sol. La chaleur est ainsi piégée, ce qui entraîne l'élévation de la température à la surface de la planète. Ce phénomène est appelé effet de serre.

Événement extrême : Phénomène rare en un endroit et à un moment de l'année particuliers. Lorsque des conditions météorologiques extrêmes se prolongent pendant un certain temps, l'espace d'une saison par exemple, elles peuvent être considérées comme un phénomène climatique extrême, en particulier si elles correspondent à une moyenne ou à un total en lui-même extrême (ex. : une sécheresse ou de fortes pluies pendant toute une saison).

Exposition : Présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou dans un contexte susceptibles de subir des dommages.

Forçage radiatif : Modification de l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant dans l'atmosphère et le rayonnement infrarouge qui en ressort. Ce changement est dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat, comme l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère. Plus le forçage radiatif est élevé, plus le système tend à se réchauffer.

Impacts climatiques (conséquences) : Effets sur les systèmes naturels et humains des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes et des changements climatiques.

Impacts physiques du changement climatique : Tel qu'employés par le GIEC, ils désignent les impacts du changement climatique sur les systèmes physiques naturels, incluant les inondations, les sécheresses et la montée du niveau de la mer. Ils sont un sous-ensemble des impacts climatiques.

Météo : La météo décrit les phénomènes atmosphériques tels que la température, la pluie, les nuages, ou la vitesse du vent d'après des mesures horaires ou journalières.

Modèle climatique : Représentation numérique du système climatique fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus d'interaction et de rétroaction, et qui tient compte d'une partie de ses propriétés connues.

Projection climatique – ou scénario de changement climatique : Simulation de la réponse du système climatique à un scénario futur d'émissions ou de concentration de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols, obtenue généralement à l'aide de modèles climatiques.

Résilience : Capacité des systèmes sociaux, économiques ou environnementaux à faire face à une perturbation, une tendance ou un événement dangereux, leur permettant d'y réagir ou de se réorganiser de façon à conserver leur fonction essentielle, leur identité et leur structure, tout en gardant leurs facultés d'adaptation, d'apprentissage et de transformation.

Sensibilité : La sensibilité décrit à quel point le système peut être affecté, de manière néfaste ou bénéfique, par un changement.

Système climatique : Système complexe constitué de cinq composantes principales : l'atmosphère, l'hydrosphère (océan, lacs, rivières...), la cryosphère (glaces terrestres, couverture neigeuse...), la biosphère, et les continents, et qui résulte de leurs interactions.

Vulnérabilité : Propension ou prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité et l'incapacité de faire face et de s'adapter.

Bibliographie

- Amerighi, O. Ciorba, U. & Tommasino, M.C. (2010). Models Characterization Report—Analysing Transition Planning and Systemic Energy Planning Tools for the implementation of the Energy Technology Information System (ATEsT). http://www.cres.gr/atest/pdf/D_2_1_Models_Characterisation_Report.pdf
- Antosiewicz, M., & Kowal, P. (2016). *Memo III - A large scale multi-sector DSGE model*. IBS Research Report http://ibs.org.pl/app/uploads/2016/02/IBS_Research_Report_02_2016.pdf
- Bauer, N., Calvin, K., Emmerling, J., Fricko, O., Fujimori, S., Hilaire, J., ... van Vuuren, D. P. (2017). *Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector – Quantifying the Narratives*. Global Environmental Change, 42, 316-330. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.006>
- BP - British Petroleum. (2019). *Energy Outlook 2019 edition*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>
- Callonnec, G., Landa Rivera, G., Malliet, P., Reynes, F., & Tamsamani, Y. (2013). *A full description of the Three-ME model : Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34785.30565>
- Dreal des Pays de la Loire. (2012). *Prospective territoriale—Lexique*. <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/lexique-de-prospective-territoriale-r821.html>
- Fédération Française de l'Assurance. (2015). *Changement climatique et assurance à l'horizon 2040*. <https://www.ffa-assurance.fr/la-federation/publications/enjeux-climatiques/etude-changement-climatique-et-assurance-horizon-2040>
- France Stratégie. (2019). *La valeur de l'action pour le climat*. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-la-valeur-de-l'action-pour-le-climat_0.pdf
- Greenpeace. (2015). *Energy [R]evolution—A sustainable world*. <https://www.greenpeace.org/canada/fr/publications/1575/revolution-energetique-2015/>
- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., ... Valin, H. (2018). *A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies*. Nature Energy, 3(6), 515-527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- Guivarch, C., & Rogelj, J. (2017). Carbon price variations in 2°C scenarios explored. Carbon Pricing Leadership Coalition, USA.
- Guivarch, C., & Rozenberg, J. (2013). *Les nouveaux scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique*. Pollution Atmosphérique : climat, santé, société, Le Kremlin Bicêtre : Revue Pollution atmosphérique, 2013, Numéro Spécial Climat, pp.1-9. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01053730/document>
- IEA. (2018a). *World Energy Model – Documentation 2018 version*. <https://www.iea.org/media/weoewebsite/energymodel/WEM2018.pdf>
- IEA. (2018b). *World Energy Outlook 2018*. <https://www.iea.org/weo2018/scenarios/>
- IRENA. (2019). *Global Energy Transformation : A Roadmap to 2050 (2019 Edition)*. <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-The-REMap-transition-pathway>
- IRENA. (2017). *Methodology background document : Development of a decarbonisation pathway for the global energy system to 2050*. <https://www.irena.org/remap/Methodology>
- Kriegler, E., Edmonds, J., Hallegatte, S., Ebi, K. L., Kram, T., Riahi, K., ... van Vuuren, D. P. (2014). *A new scenario framework for climate change research : The concept of shared climate policy assumptions*. Climatic Change, 122(3), 401-414. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0971-5>
- Le Quéré, C., et al. (2018). *Global Carbon Budget 2018*. Earth Syst. Sci. Data, 10, 2141-2194, <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>
- Mora, C., Spirandelli, D., Franklin, E. C., Lynham, J., Kantar, M. B., Miles, W., ... Hunter, C. L. (2018). *Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions*. Nature Climate Change, 8(12), 1062-1071. https://www.researchgate.net/publication/329042311_Broad_threat_to_humanity_from_cumulative_climate_hazards_intensified_by_greenhouse_gas_emissions
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., ... Wilbanks, T. J. (2010). *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature, 463(7282), 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Neshat, N., Amin-Naseri, M. R., & Danesh, F. (2017). *Energy models : Methods and characteristics*. Journal of Energy in Southern Africa, 25(4), 101-111. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2014/v25i4a2243>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... Solecki, W. (2017). *The roads ahead : Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century*. Global Environmental Change, 42, 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Perrier, Q., Guivarch, C., & Boucher, O. (2018). *L'objectif « zéro émissions nettes » de l'Accord de Paris : signification et implications*. La Météorologie, 103, 26-30. <https://doi.org/10.4267/2042/68784>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... Tavoni, M. (2017). *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : An overview*. Global Environmental Change, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

- Shell. (2017). *World Energy Model, a view to 2100*. <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenarios-energy-models/world-energy-model.html>
- Shell. (2018). *Shell scenarios—Sky, meeting the goals of the Paris Agreement*. <https://www.shell.fr/energy-and-innovation/scenario-sky.html>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). *The representative concentration pathways : An overview*. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Gernaat, D. E. H. J., Doelman, J. C., van den Berg, M., Harmsen, M., ... Tabeau, A. (2017). *Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm*. *Global Environmental Change*, 42, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008>
- Wilbanks, T. J., & Ebi, K. L. (2014). *SSPs from an impact and adaptation perspective*. *Climatic Change*, 122(3), 473-479. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0903-4>
- GIEC**
- Clarke L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P. R. Shukla, M. Tavoni, B. C. C. van der Zwaan, and D.P. van Vuuren. (2014). *Assessing Transformation Pathways*. 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, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf
- Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen. (2013). *Evaluation of Climate Models*. 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 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter09_FINAL.pdf
- Forster, P., D. Huppmann, E. Kriegler, L. Mundaca, C. Smith, J. Rogelj, and R. Séférian.(2018). *Mitigation Pathways Compatible with 1,5°C in the Context of Sustainable Development Supplementary Material*. In : *Global Warming of 1,5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., 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, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf
- change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., 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, and T. Waterfield (eds.)]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_SM_Low_Res.pdf
- GIEC. (2013). *Annex I : Atlas of Global and Regional Climate Projections* [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (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. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_AnnexI_FINAL-1.pdf
- GIEC (2014a). *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. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
- GIEC (2014b). *Résumé à l'intention des décideurs*. In: *Changements climatiques 2014, L'atténuation du changement climatique*. Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG3AR5_SPM_brochure_fr-1.pdf
- GIEC. (2018). *Summary for Policymakers*. In: *Global Warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., 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, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf

- Jones, R.N., A. Patwardhan, S.J. Cohen, S. Dessai, A. Lammel, R.J. Lempert, M.M.Q. Mirza, and H. von Storch (2014). *Foundations for decision making*. In : Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 195-228. (Wilbanks & Ebi, 2014) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap2_FINAL.pdf
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao. (2007). *Global Climate Projections*. In : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter10-1.pdf>
- Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférián, and M.V. Vilariño. (2018). *Mitigation Pathways Compatible with 1,5°C in the Context of Sustainable Development*. In : Global Warming of 1,5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., 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, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf
- Roy, J., P. Tschakert, H. Waisman, S. Abdul Halim, P. Antwi-Agyei, P. Dasgupta, B. Hayward, M. Kanninen, D. Liverman, C. Okereke, P.F. Pinho, K. Riahi, and A.G. Suarez Rodriguez. (2018). *Sustainable Development, Poverty Eradication and Reducing Inequalities*. In : Global Warming of 1,5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., 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, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter5_Low_Res.pdf



www.i4ce.org