

LE PIC PÉTROLIER PEUT-IL CONTRIBUER À EVITER UN SCÉNARIO EXTREME DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE?

Patrick Brocorens

Mai 2015

Laboratoire de Chimie des Matériaux Nouveaux, UMONS, 20 Place du Parc, B-7000 Mons, Belgique
ASPO.be, 19, Avenue Victor Maistriau, B-7000 Mons, Belgique
Email : patrick.brocorens@umons.ac.be

I. Introduction

Les énergies fossiles contribuent aux émissions de gaz à effet de serre (GreenHouse Gases, GHG) à hauteur de 62% sous forme de CO₂ libéré lors de la combustion, ainsi qu'environ 8% sous forme de méthane et de protoxyde d'azote. La part des émissions de GHG directement imputable à l'utilisation des énergies fossiles est donc d'environ 70%¹. La position dominante qu'occupent les énergies fossiles dans l'approvisionnement énergétique n'est pas prête de disparaître, mais il y a des contraintes physiques étroitement liées à des contraintes économiques, qui augmentent avec le temps et finissent par peser significativement sur les capacités de production. En particulier, le pétrole est la première des ressources carbonées fossiles dont la production est gênée par ces contraintes, qui la conduisent inexorablement vers un maximum puis un long déclin.

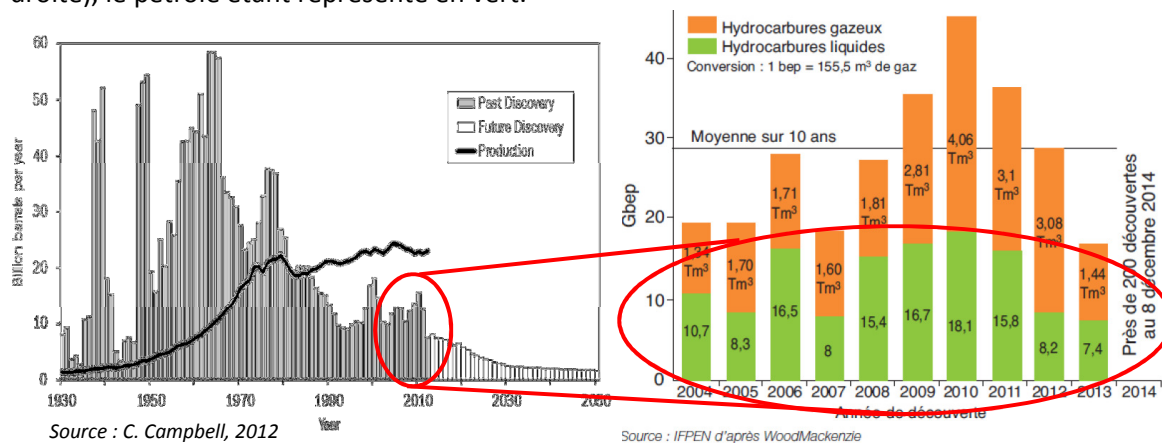
Le but de ce document est d'aborder l'effet que ces contraintes physico-économiques à la production peuvent avoir sur les émissions de CO₂ et les prévisions de changements climatiques modélisées à partir de ces émissions par le GIEC. Le scénario de production envisagé fait abstraction de toute mesure climatique, et il est comparé à des scénarios du GIEC qui font également abstraction de mesures climatiques (scénarios de référence). Mais il a également été comparé aux scénarios du GIEC qui en tiennent compte (scénarios d'atténuation, de stabilisation), ce qui permet d'évaluer dans quelle mesure certains objectifs climatiques peuvent être approchés grâce aux contraintes internes aux filières fossiles, dans le cas où les contraintes externes de nature politique viendraient à faire défaut.

Les scénarios de l'IEA (International Energy Agency) ont également été ajoutés à ces comparaisons. Les scénarios de l'IEA ont toute leur place ici, non seulement parce que l'IEA est une référence pour les politiques énergétiques, mais aussi parce que l'IEA a converti ses projections de production de pétrole, gaz et charbon en émissions de CO₂ et en augmentations de températures correspondantes par rapport aux niveaux préindustriels. L'IEA a ainsi établi différents scénarios énergétiques en fonction de certaines politiques climatiques choisies, avec des objectifs climatiques à atteindre ou non. Ces scénarios présentent des trajectoires pour chaque énergie fossile, ce qui permet d'obtenir une vision détaillée par énergie fossile, qu'on ne pourrait avoir si les émissions de CO₂ des différentes sources d'énergies étaient combinées.

II. Scénario de productions d'énergies fossiles considéré dans ce travail.

Bien que les ressources – tout ce qui existe – en hydrocarbures fossiles soient encore en grande quantité, la fraction de ces ressources qui peut être exploitée dans des conditions économiques et techniques « compatibles avec le mode de fonctionnement de la société actuelle » est beaucoup plus restreinte. Le débat entre optimistes et pessimistes des ressources tient pour beaucoup en ce qu'on entend par « compatibles avec le mode de fonctionnement de notre société », ainsi qu'en la foi portée à la technologie pour atteindre cette compatibilité. Ainsi, bien que les ressources en schistes bitumineux soient plusieurs fois équivalentes à ce qui a été consommé jusqu'à présent sous forme de pétrole conventionnel, il n'existe toujours pas de procédé commercial de synthèse de pétrole synthétique à partir de ces ressources. Une des raisons à cela tient en la quantité d'énergie qu'il faut dépenser pour effectuer cette synthèse, quelle que soit la technologie utilisée, ce qui rend la liquéfaction des schistes bitumineux peu intéressante d'un point de vue énergétique, et par extension, d'un point de vue économique. Nombre de ces ressources nécessitent même plus d'énergie pour les extraire de leur environnement qu'elles ne peuvent en fournir, supprimant de facto leur qualité de source d'énergie. Un faible taux de retour énergétique² signifie également des coûts de production et des prix plus élevés, et à partir de certains seuils de prix, la société se transforme, des alternatives apparaissent, qui entraînent une diminution de la demande. Les caractéristiques physiques des ressources sont donc indissociables de leurs aspects économiques, et ces contraintes se matérialisent tant au niveau de l'offre que de la demande. Il est ainsi évident qu'une contrainte au niveau de la demande, par des prix trop élevés par exemple, pèsera sur les productions.

Figure 1 : Evolution des découvertes et de la production de pétrole conventionnel depuis 1930 (image de gauche) ; évolution récente des découvertes de pétrole et gaz conventionnels (image de droite), le pétrole étant représenté en vert.

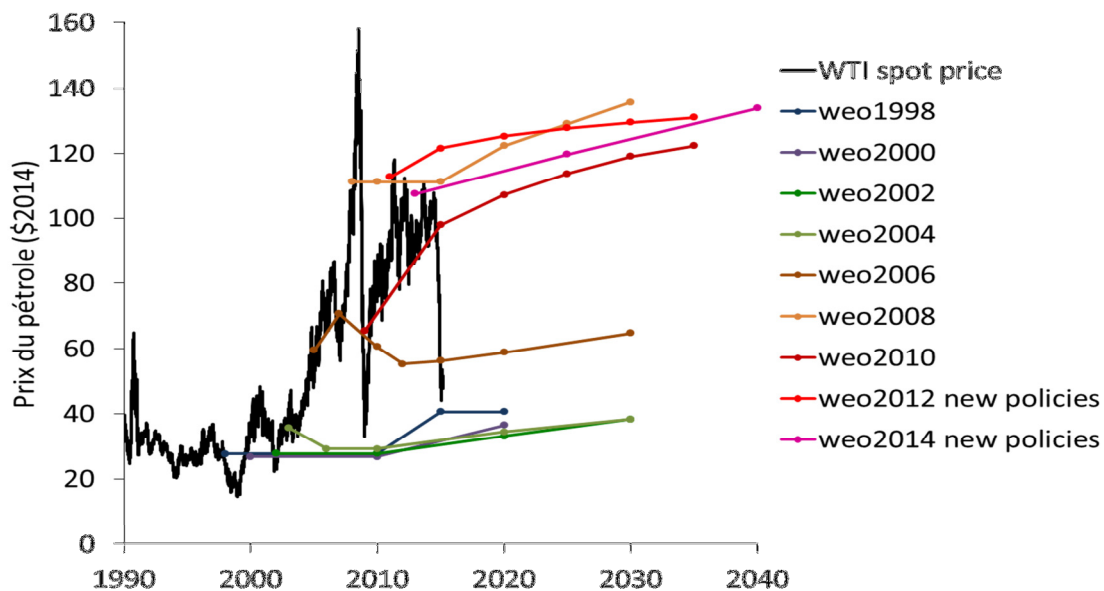


A l'heure actuelle, de nombreux indicateurs montrent que les contraintes physico-économiques pèsent de plus en plus sur la croissance des productions des ressources fossiles. Ceci est particulièrement vrai pour le pétrole et le gaz conventionnels, qui assurent une part dominante (80% environ) de l'offre en liquides et gaz. Ces contraintes se manifestent notamment au niveau des découvertes, décevantes par rapport aux montants investis. Ainsi, fin 2014, l'IFP indiquait qu' "en dix ans, les budgets d'exploration ont été multipliés par cinq, ce qui a conduit à des découvertes majeures ; mais depuis 2010, les volumes découverts baissent chaque année malgré une croissance continue des dépenses"³. La Figure 1 montre effectivement que pour le pétrole, les découvertes ne

sont pas plus élevées aujourd’hui qu’il y a dix ans, et ne remplacent que la moitié de ce qui est extrait : environ 13 Gb/an découverts (moyenne sur 10 ans) contre 25 Gb/an consommés. La situation du gaz naturel conventionnel se détériore également, avec 2,8 Tm³ consommés annuellement, contre 2,3 Tm³ découverts - moyenne sur 10 ans).

Ces tendances ne sont pas neuves, puisque ça fait environ 30 ans que les nouvelles découvertes de pétrole ont commencé à être inférieures aux quantités de pétrole extraites, à ne plus renouveler suffisamment les réserves⁴. Malgré ce déficit de découvertes, et l’accentuation de ce déficit avec le temps (Figure 1), bien peu de personnes imaginaient que cela pèserait sur la production dans un futur prévisible. Cependant, au début du nouveau millénaire, la production de pétrole conventionnel s’est mise à plafonner, poussant le cours du pétrole à la hausse et obligeant les analystes à réviser leurs projections de prix pétrolier sur le long terme (voir par exemple les projections de l’IEA en Figure 2). Cela fait environ 10 ans que la production de pétrole conventionnel plafonne.

Figure 2 : Evolution du cours du pétrole (WTI, prix spot), et projections à long terme des cours du pétrole selon les rapports annuels de l’IEA (World Energy Outlook). Les projections de prix des WEO2000 à 2004 illustrent l’absence d’éventualité d’un pic du pétrole conventionnel jusqu’en 2030.



Le pétrole cher a certes permis le développement des pétroles de roches mères aux Etats-Unis, qui offrent une certaine croissance au marché pour quelques années. Mais le pic du pétrole conventionnel préfigure un pic tous pétroles dans un avenir proche, car le pétrole conventionnel assure la majorité de l’offre pétrolière et une fois sa production en déclin, il sera difficile de compenser ce déclin par les pétroles non conventionnels. Le potentiel de développement de ces ressources, compatible avec une demande soutenue (où les prix seraient par exemple inférieurs à 200\$/b), est en effet plus limité.

Il est hors de propos de discuter davantage ici des contraintes pesant sur les productions actuelles et futures des énergies fossiles et de leurs effets sur les productions. Le lecteur désireux d’en savoir plus consultera le rapport d’enquête publique du Parlement wallon sur le pic pétrolier⁵. Néanmoins, l’exemple du pétrole conventionnel développé ci-dessus illustre combien ces contraintes peuvent parfois être sous-estimées, et conduire à un plafonnement et déclin non-anticipés des

productions. Il semble d'ailleurs que ces contraintes soient toujours sous-estimées par l'IEA pour le pétrole conventionnel, le scénario de référence (New policies, 2014) montrant une relative stabilité de la production dans tout le domaine de prévision (jusqu'à 2040). Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé des perspectives de production de pétrole, gaz, et charbon où les contraintes peuvent être considérées comme importantes, puisque ces trois ressources plafonnent avant 2050, date limite des scénarios présentés. Ce scénario sera dénommé Scénario Pic dans la suite de ce travail. Voici les sources utilisées:

- Gaz naturel : scénario de Jean Laherrère⁶ ;
- Pétrole : moyenne d'une enquête Delphi auprès d'experts pétroliers issus des secteurs académiques, institutionnels et de l'industrie pétrolière⁷ ;
- Charbon : scénario BP jusqu'à 2030⁸, suivi d'un plateau de production.

Pour le pétrole et le gaz naturel, les auteurs des scénarios se sont basés sur les données techniques de l'industrie, et de leur évolution au cours du temps. Concernant le charbon, les incertitudes sont beaucoup plus importantes que pour le gaz et le pétrole, notamment à cause d'un manque de données fiables. Le scénario BP ne s'étend que jusqu'en 2030, et pour pouvoir comparer les trois sources d'énergie fossiles jusqu'à 2050, il a été décidé de poursuivre le plateau qui apparaît en fin de période du scénario BP. De plus amples informations méthodologiques et les données des scénarios d'émissions de CO₂ correspondantes sont indiquées en Annexe.

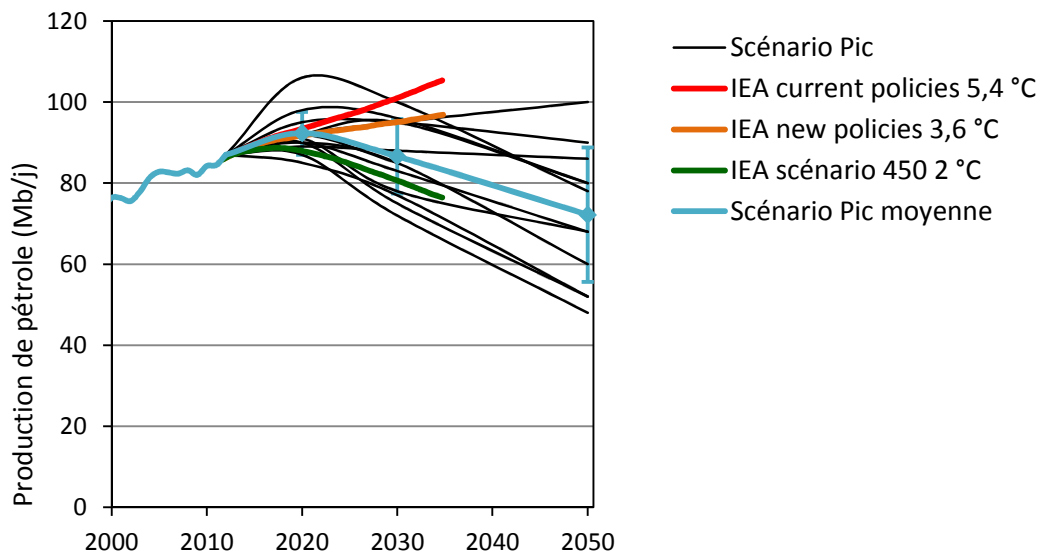
III. Comparaison du scénario de ce travail avec ceux de l'IEA.

Depuis quelques années, l'IEA présente trois scénarios de production d'énergies fossiles (Current policies, New policies, Scénario 450), qui diffèrent essentiellement par l'ampleur des politiques adoptées en vue de réduire les émissions de CO₂. Le scénario Current policies n'envisage aucune autre mesure politique de réduction des émissions de CO₂ que celles déjà adoptées. Le scénario New policies, scénario central de l'IEA, prend en considération les mesures déjà adoptées, et partiellement celles récemment annoncées. Et le Scénario 450 correspond à un monde où des mesures fortes seraient prises pour avoir 50% de chance de limiter à 2°C l'augmentation à long terme des températures.

Nous analyserons ici les scénarios du WEO2012, qui ont été étendus jusqu'en 2200 en ce qui concerne les émissions de GHG. Dans ses deux premiers scénarios, l'IEA n'envisage de plafonnement de production pour aucune des énergies fossiles d'ici 2035. En d'autres termes, l'IEA juge que les contraintes physico-économiques qui pèsent sur les filières fossiles sont suffisamment faibles que pour permettre une poursuite de la croissance des productions, et que seules des mesures politiques favorisant la réduction des émissions de CO₂ pourraient limiter la production. Ce travail propose un point de vue différent, en particulier pour le pétrole, ce qui permet d'évaluer dans quelle mesure les contraintes naturelles aux filières énergétiques doivent être complétées par des mesures politiques pour limiter à 2°C l'augmentation à long terme des températures (scénario 450).

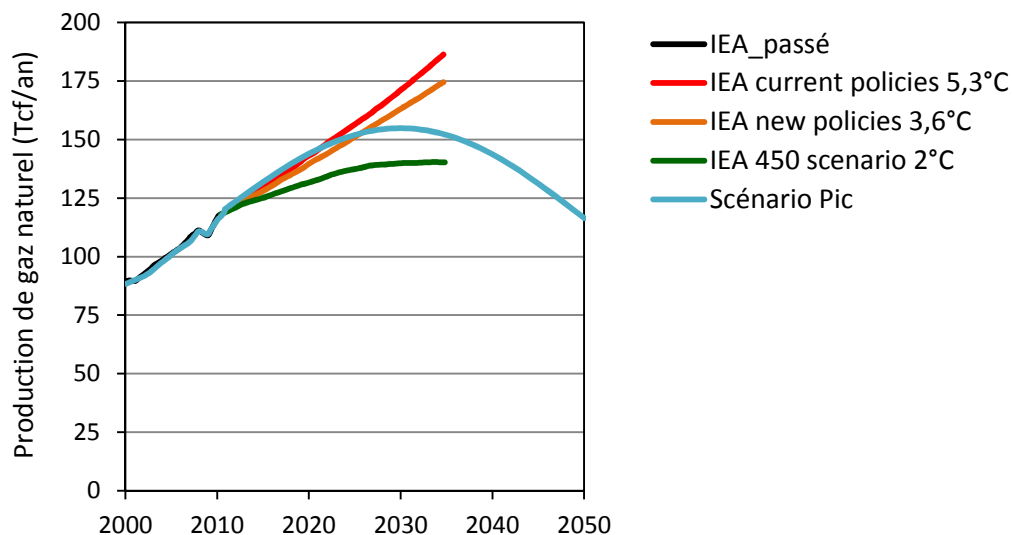
Comme l'illustre la Figure 3, le scénario pétrole de cette étude (Scénario Pic) suit la trajectoire du scénario 450, environ 4-6 Mb/j au-dessus, avec un plafonnement de la production vers 2020 suivi d'un déclin, ce qui suggère que le pétrole pourrait remplir grosso modo sa part du contrat pour maintenir à 450 ppm la concentration en GHG dans l'atmosphère, sans qu'aucune mesure politique forte ne soit appliquée sur la filière pétrolière.

Figure 3 : Scénarios de production mondiale de pétrole (entrée raffinage) selon l'IEA et ce travail. Les trajectoires de l'enquête Delphi auprès des experts pétroliers ont été représentées (Scénario Pic), ainsi que la moyenne et l'écart type.



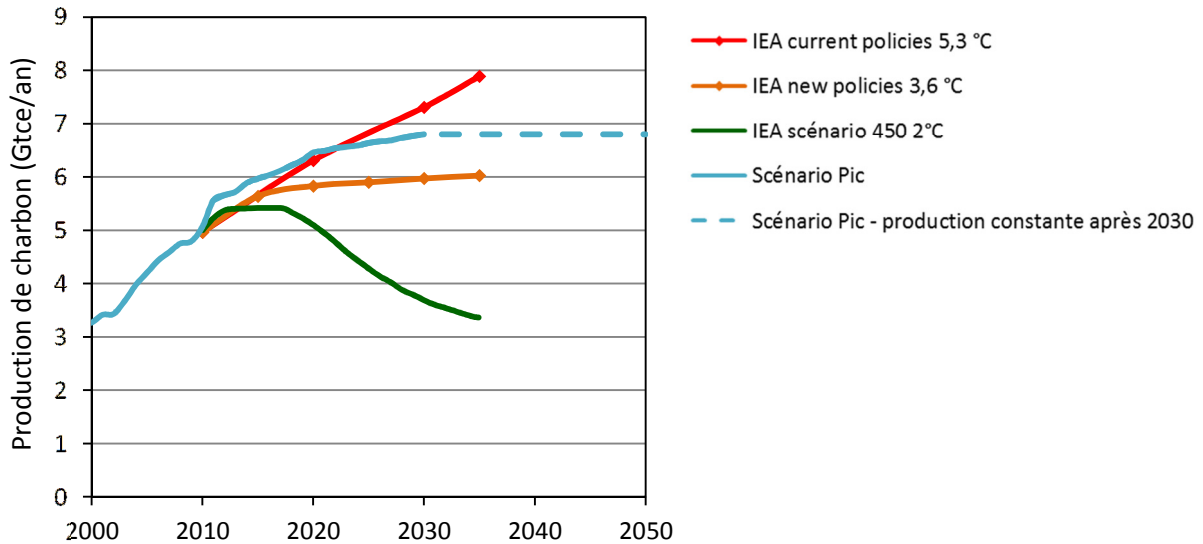
Pour le gaz naturel, la trajectoire envisagée dans ce travail est supérieure à celle du scénario 450 et suit même jusque 2020 le scénario le plus élevé de l'IEA (Figure 4). Cela reflète essentiellement le fait que, dans ce travail, on suppose qu'à moyen terme, la communauté internationale restera largement inerte face aux défis climatiques, et que les mesures politiques pour limiter les émissions de GHG resteront marginales. Mais après un pic du gaz naturel envisagé vers 2030 dû aux contraintes physico-économiques de la filière, les directions des deux trajectoires convergent. Il est ainsi possible que la trajectoire du gaz naturel passe sous le scénario 450 entre 2040 et 2050. L'excès d'émissions de CO₂ sur la période 2012-2040 pourrait donc être compensé ultérieurement. Dans le même temps, les émissions de méthane associées à l'exploitation du gaz naturel suivront probablement une trajectoire similaire, renforçant le rôle du déclin de la production de gaz naturel dans la baisse des émissions de GHG lorsque le gaz naturel aura passé son pic de production.

Figure 4 : Scénarios de production mondiale de gaz naturel selon l'IEA et ce travail.



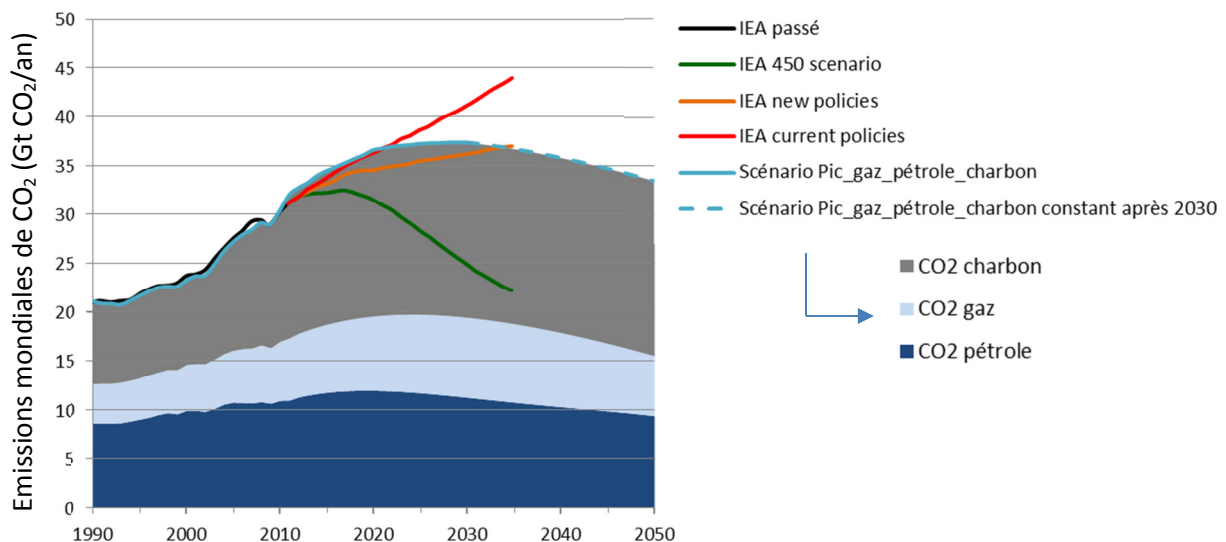
La trajectoire du charbon (Figure 5), quant à elle, se comporte sur le moyen terme de façon similaire à celle du gaz naturel, puisqu'elle est supérieure au scénario le plus élevé de l'IEA jusqu'à 2020 environ. Mais sur le long terme, elle se maintient entre les scénarios Current policies et New policies, et diverge de la trajectoire du scénario 450. Parmi les trois énergies fossiles, le charbon est celle qui empêche largement de stabiliser à 450 ppm la concentration en GHG sur le long terme.

Figure 5 : Scénarios de production mondiale de charbon selon l'IEA et ce travail.



Les émissions de CO₂ du Scénario Pic ont été réparties selon les trois énergies fossiles considérées pour évaluer leurs contributions respectives (Figure 6). Les émissions de pétrole, gaz et charbon atteignent leur maximum respectivement en 2020, 2030, et 2030, suivant en cela les trajectoires de production des énergies fossiles. Le charbon constitue le plus gros contributeur aux émissions, avec 37% des émissions de CO₂ en 2000, 46% en 2012 due à la forte croissance du charbon par rapport au gaz et au pétrole, et plus de la moitié des émissions en 2050. Globalement, on se retrouve effectivement bien loin du scénario 450 de l'IEA, puisqu'on se retrouve même au-delà du scénario New policies jusque 2035, date limite de ce scénario de l'IEA.

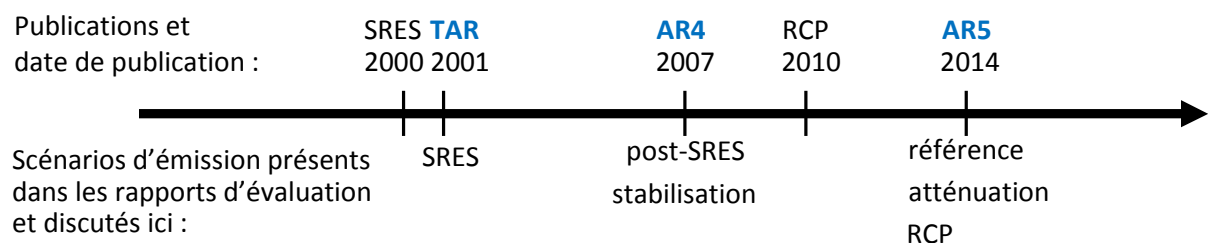
Figure 6 : Scénarios d'émission de CO₂ de l'IEA et de ce travail pour le secteur de l'énergie.



Nous avons ensuite comparé la trajectoire d'émission du Scénario Pic avec les scénarios d'émission du GIEC, ce qui permet notamment d'évaluer vers quelle gamme de variations de température le Scénario Pic peut conduire.

IV. Comparaison avec les scénarios du GIEC.

Les modèles d'évolution du climat du GIEC traduisent en changement climatique les trajectoires d'émissions de GHG. Pour avoir une idée du climat futur, le GIEC utilise donc une série de scénarios d'émission, qui a été progressivement enrichie au cours du temps. Nous ne discuterons que de ceux présents dans les trois derniers rapports d'évaluation, dénommés TAR (*third assessment report*, 2001), AR4 (*fourth assessment report*, 2007), et AR5 (*fifth assessment report*, 2014). La ligne du temps ci-après résume l'évolution des scénarios d'émission envisagés par le GIEC depuis 2000.



On distingue essentiellement trois catégories de scénarios:

- 1) Les scénarios sans mesures climatiques : scénarios SRES, post-SRES, et de référence.
- 2) Les scénarios avec mesures climatiques : scénarios d'atténuation, de stabilisation.
- 3) Les scénarios représentatifs de l'ensemble des futurs possibles (avec ou sans mesures climatiques) : scénarios RCP (*representative concentration pathway*).

IV.1. Scénarios du GIEC sans mesures climatiques

Les scénarios SRES (Special Report on Emission Scenario) utilisés dans le TAR(2001), les scénarios post-SRES de l'AR4(2007), et *baseline* de l'AR5(2014) peuvent être considérés comme des scénarios de référence, où aucune mesure climatique supplémentaire n'est prise pour limiter les émissions de GHG.

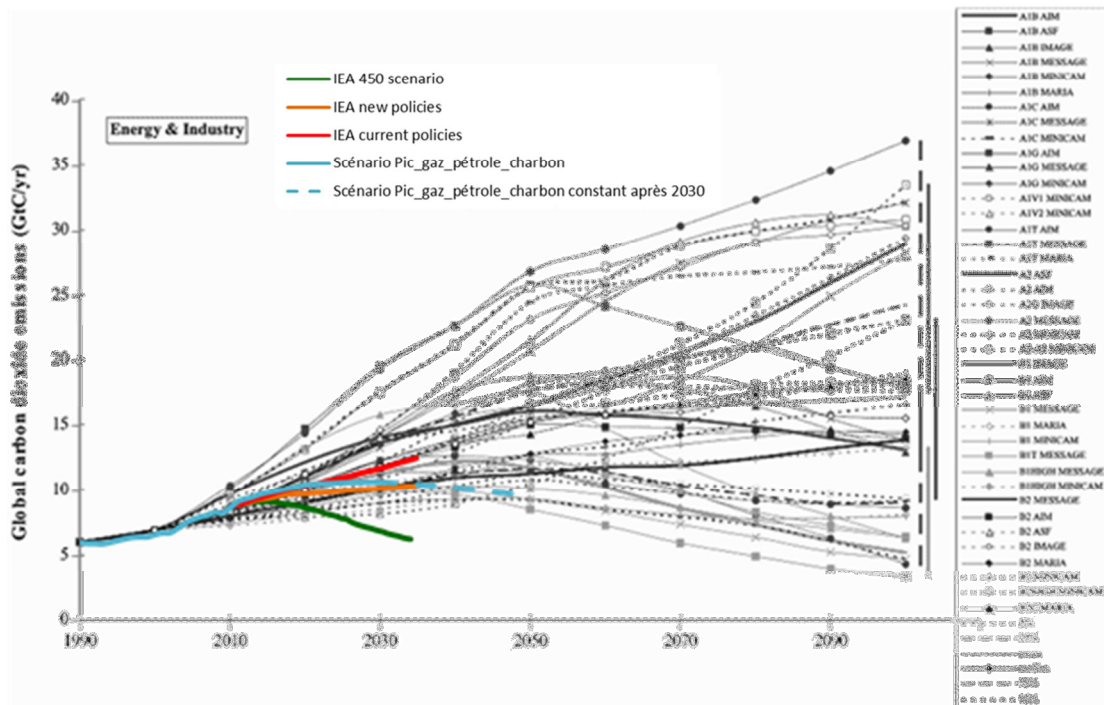
Ces scénarios servent de trame narrative du futur, et présentent une large gamme possible de trajectoires d'émissions de GHG reflétant les nombreuses incertitudes concernant l'évolution future de la société. Comment seront structurées les économies ? Quelles seront les technologies et filières énergétiques suivies ? Qu'en sera-t-il de l'utilisation des sols et des choix individuels ?

Pour le SRES, 40 scénarios ont été proposés, regroupés en quatre familles selon les niveaux de compromis régionalisation-globalisation et économie-environnement. Pour l'AR4 (2007), les scénarios de référence ont été réactualisés et tiennent compte des politiques d'atténuation et de développement durable qui étaient de mise en 2007 (les études plus récentes intègrent les mesures prises au titre de la CCNUCC et du Protocole de Kyoto adopté en 1997), mais toujours sans politiques climatiques additionnelles. Ces scénarios dits post-SRES, puisqu'ils ont suivi les scénarios SRES, sont comparables à ces derniers, si ce n'est de petites différences dues notamment à certains facteurs

d'émission revus à la baisse, par exemple dans les projections démographiques, ou une meilleure prise en compte du rôle des émissions d'aérosols⁹. Pour l'AR5 (2014), la gamme des scénarios de référence a été étendue à environ 300 scénarios. Les plus bas de ces scénarios en termes d'émissions de GHG sont cependant plus élevés que les scénarios SRES les plus bas. La raison de ces différences est probablement due à un déplacement de la ligne de démarcation entre ce qu'on entend par scénario sans mesure climatique et scénario avec mesure climatique. Dès le rapport TAR, plusieurs experts avaient pointé la difficulté de différencier, d'une part certains scénarios sans politique climatique mais ayant des émissions relativement basses (par exemple certains scénarios SRES), et d'autre part, certains scénarios avec politique climatique (scénarios d'atténuation, de stabilisation). Certaines mesures à buts « non-climatiques » peuvent en effet réduire davantage les émissions que certaines mesures « climatiques » (par exemple, des mesures d'efficacité énergétique peuvent être prises pour des raisons autres que climatiques). Le choix de décider si les mesures entrent dans le cadre d'une politique climatique ou non revient au concepteur du scénario, en fonction de la trame narrative du scénario. Une discussion sur ce problème de distinction entre ces deux catégories de scénarios peut être trouvée dans le TAR¹⁰.

En Figure 7 sont comparés les scénarios d'émissions de CO₂ (énergie + industrie) SRES du GIEC avec ceux de l'IEA et de ce travail. Le Scénario Pic se situe clairement dans le bas des scénarios SRES du GIEC, plus précisément dans la famille de scénarios B1 (le scénario marqueur B1, légèrement supérieur au Scénario Pic, conduit à 600 ppm de CO₂-eq dans l'atmosphère à l'horizon 2100). C'est dans cette zone que se trouve également le scénario New policies de l'IEA.

Figure 7 : Scénarios d'émission de CO₂ (énergie et industrie combinés) selon le SRES (40 scénarios), l'IEA et ce travail.

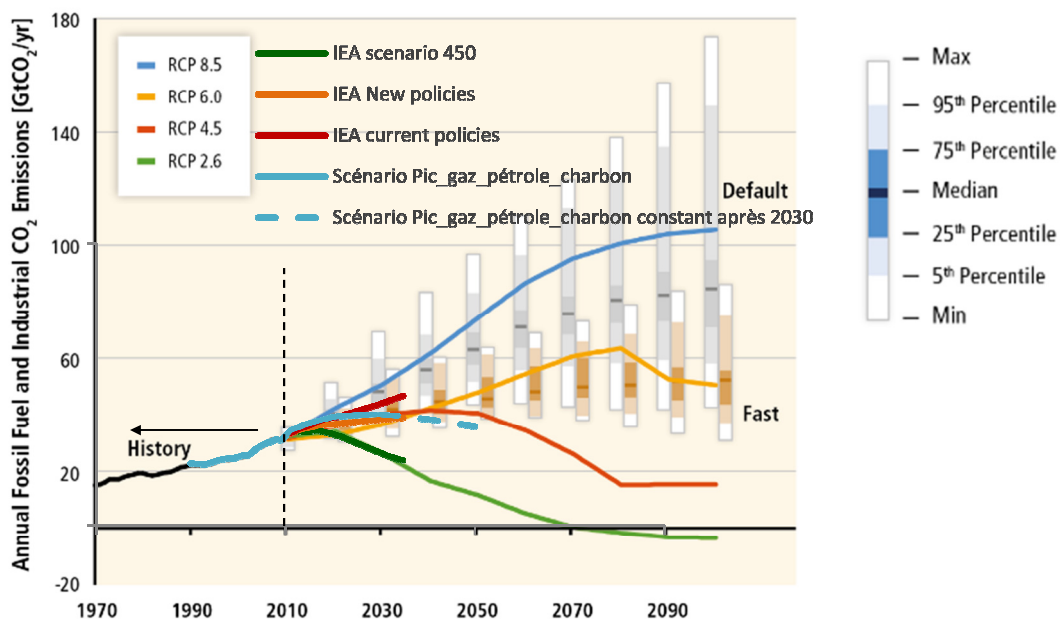


La différence entre les scénarios Pic, B1, et New Policies se situe au niveau de la nature des contraintes aux émissions de CO₂. Les scénarios GIEC de la famille B1 supposent un degré élevé de conscience environnementale et sociale, combiné à une approche globale cohérente vers un développement plus durable. Ils supposent une évolution rapide vers une économie de services et

d'information, avec une diminution de l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficace. Ils supposent également une transition relativement douce vers des systèmes d'énergie alternative à mesure que les ressources conventionnelles de pétrole et gaz déclinent. Durant la transition, le gaz conventionnel et non-conventionnel est largement utilisé en tant que ressource fossile la plus propre, mais l'effort principal est porté vers les technologies post-fossiles, motivées en partie par les préoccupations environnementales. Les scénarios B1 prennent donc partiellement en compte des contraintes au niveau de l'offre en ressources (pétrole et gaz conventionnels), mais la majorité des contraintes aux émissions de CO₂ se situe au niveau de la demande. Aucune initiative explicite n'est prise pour limiter le changement climatique, bien que nombre des mesures citées dans ce scénario se retrouvent aussi dans la panoplie des mesures envisagées par les scénarios appliquant des politiques climatiques.

Dans le scénario New Policies de l'IEA, une certaine dose de mesures climatiques est introduite. Et dans l'esprit de ce travail, les contraintes aux émissions de CO₂ sont les contraintes physico-économiques propres aux filières fossiles, les mesures politiques ou de prise de conscience environnementale étant supposées d'un impact marginal à l'échelle globale. Il est cependant probable que le renchérissement du prix des énergies fossiles à l'approche de leurs pics de production stimule l'adoption de mesures envisagées dans B1, telles que l'utilisation plus efficace des ressources ou le déploiement d'énergies alternatives. En résumé, il s'agit donc de trois trajectoires assez proches, mais où les contraintes conduisant à ces trajectoires sont de natures bien différentes.

Figure 8 : Scénarios d'émission de CO₂ (énergie et industrie combinés) selon les scénarios de référence de l'AR5¹¹ (900 scénarios) avec croissance implicite (gamme grisée) ou réduction rapide de l'intensité énergétique (gamme orangée), et scénarios de l'IEA et de ce travail. Notez que la distribution de probabilité associée aux scénarios de l'AR5 reflète les probabilités de rencontrer ces niveaux d'émission dans la littérature scientifique et non les probabilités d'atteindre ces niveaux dans la réalité. Les scénarios RCP de l'AR5¹⁸ ont également été représentés ; ils seront discutés au point IV.2.2.



Des observations relativement similaires peuvent être faites en comparant avec les scénarios post-SRES de l'AR4, et les scénarios de référence de l'AR5. La gamme des scénarios post-SRES est cependant plus large que celle des scénarios SRES, ce qui explique que certains scénarios post-SRES puissent être beaucoup plus bas que le Scénario Pic ou même que le scénario 450 de l'IEA (voir Figure 11 du paragraphe IV.2.1). Dans l'AR5, par contre, tous les scénarios de référence sont au-dessus du scénario Pic en 2050 (Figure 8). Comme expliqué précédemment, ces différences entre l'AR5 et les rapports antérieurs peuvent sans doute s'expliquer par la frontière mal définie entre scénarios climatiques et non-climatiques, qui a probablement fluctué au gré des publications. On notera tout de même que le scénario le plus élevé de l'IEA (Current Policies), optimiste quant à l'effet des contraintes sur les débits de production des ressources, et qui peut être considéré comme un scénario de référence vu qu'il ne présente pas de mesures climatiques autres que celles adoptées à mi-2012, est inférieur à plus de la moitié des scénarios avec croissance implicite de l'AR5 (gamme grisée en Figure 8). Quant aux Scénarios Pic et New policies, ils suivent la valeur médiane des scénarios avec réduction rapide de l'intensité énergétique de l'AR5 (gamme orangée en Figure 8) jusque 2030, le Scénario Pic se retrouvant ensuite inférieur à tous ces scénarios en 2050. Il semble donc que la plupart des scénarios de référence du GIEC sont, comme ceux de l'IEA, optimistes quant à la capacité de l'homme à surmonter les contraintes pesant sur les filières fossiles et à augmenter fortement les productions dans le futur. Ce travail se situe donc dans la série des études qui, dès la parution des scénarios SRES, estiment que beaucoup des scénarios de référence du GIEC sont exagérés en ce qui concerne l'offre en pétrole et gaz^{1,12}. Par exemple, le scénario SRES le plus extrême, AIG AIM, conduit à des débits de pétrole en 2100 plus de quatre fois supérieurs aux débits observés en 2000. Cela semble peu réaliste, alors que ce scénario « représente un futur pertinent et plausible » aussi « neutre » que celui des autres scénarios.

IV.2. Scénarios du GIEC avec mesures climatiques

Les scénarios de référence ne comportent pas de mesures spécifiques de réduction des émissions de GHG. Etant donné que ces scénarios, une fois introduits dans les modèles climatiques, conduisent à des pronostics de hausses de température importantes à l'horizon 2100, le GIEC a aussi étudié des scénarios d'atténuation ou de stabilisation, qui comportent des politiques ou des mesures explicites ou implicites dont le premier objectif serait de réduire les émissions de CO₂ ou d'autres GHG¹³ :

Les **scénarios d'atténuation** sont généralement définis comme une description et une projection quantifiée des mesures à prendre pour réduire les émissions de GHG par rapport à un scénario de référence. Ils contiennent de nouveaux profils d'émission, ainsi qu'une estimation des coûts associés aux réductions des émissions.

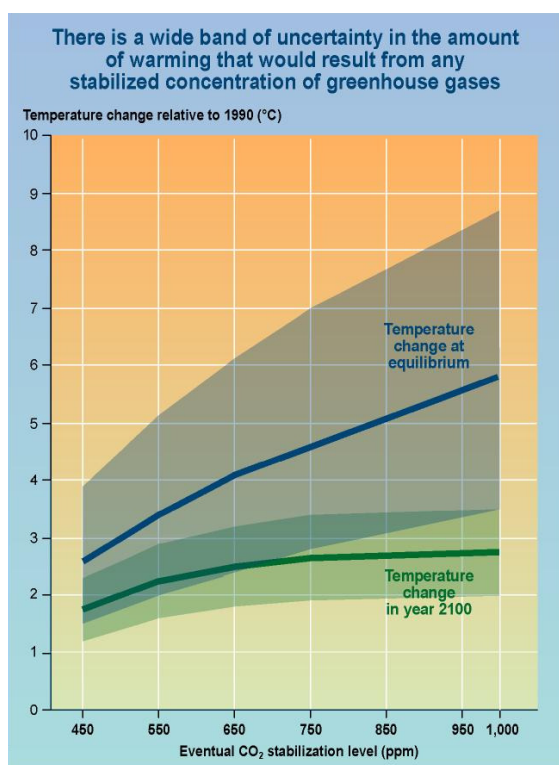
Les **scénarios de stabilisation** sont des scénarios d'atténuation où l'on introduit des cibles spécifiques de changement climatique, comprenant des niveaux de concentrations atmosphériques limites en CO₂ ou en GHG exprimés en équivalent CO₂ (CO₂-eq), ou une variation maximale permise des températures ou du niveau de la mer.

Nous discuterons des scénarios de stabilisation de l'AR4 (2007) et des scénarios d'atténuation de l'AR5 (2014).

IV.2.1. Scénarios de stabilisation de l'AR4.

Alors que les scénarios SRES s'arrêtent en 2100, avec le changement de température anticipé à cette date, les scénarios de stabilisation de l'AR4 vont au-delà de 2100, de manière à prendre en compte l'inertie climatique. A mêmes volumes d'émissions cumulées de GHG d'ici 2100 que dans les scénarios SRES, les scénarios de stabilisation peuvent donc être associés à des concentrations en GHG et des températures plus élevées que les scénarios SRES. La Figure 9 illustre la différence qui peut exister entre les changements de température anticipés en 2100 et lorsque les températures sont finalement stabilisées.

Figure 9 : Changement de température par rapport à 1990, anticipé en 2100 et lorsque la température sera équilibrée, pour différents niveaux de stabilisation de la concentration en CO₂¹⁴.



Globalement, les scénarios de stabilisation ont des trajectoires d'émission de CO₂ plus basses que celles des scénarios de référence (voir Figure 11). Par ailleurs, plus le niveau de stabilisation en CO₂ visé est bas, au plus tôt doivent avoir lieu le pic et le déclin des émissions de CO₂. Les mêmes observations peuvent être faites pour les scénarios d'atténuation de l'AR5, car un scénario d'atténuation est construit par rapport à un scénario de référence qui sert à mesurer l'étendue et la nature des efforts d'atténuation pour atteindre un objectif climatique.

Dans le rapport AR4, 177 scénarios de stabilisation ont été évalués et groupés en 6 catégories, selon la concentration de CO₂-eq stabilisée visée sur le long terme. Les caractéristiques de ces scénarios sont reprises en Table 1.

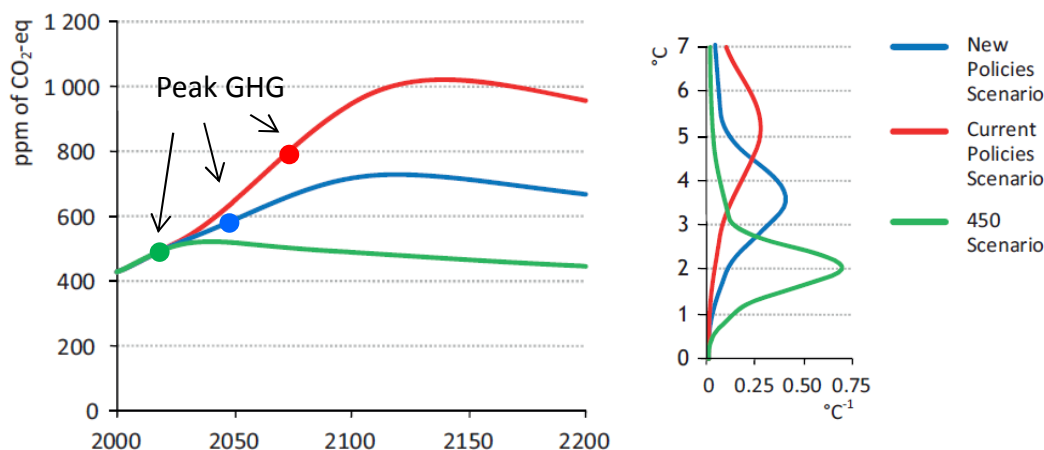
Table 1 : Caractéristiques des scénarios de stabilisation contenus dans l'AR4¹⁵.

Catégorie	Concentration en CO ₂ (ppm)	Concentration en CO ₂ -eq (ppm)	Augmentation globale moyenne des températures (°C) au-dessus des niveaux préindustriels	Date du pic des émissions de CO ₂	Changement dans les émissions globales de CO ₂ en 2050 (% de 2000)
I	350-400	445-490	2,0-2,4	2000 - 2015	-85 to -50
II	400-440	490-535	2,4-2,8	2000 - 2020	-60 to -30
III	440-485	535-590	2,8-3,2	2010 - 2030	-30 to +5
IV	485-570	590-710	3,2-4,0	2020 - 2060	+10 to +60
V	570-660	710-855	4,0-4,9	2050 - 2080	+25 to +85
VI	660-790	855-1130	4,9-6,1	2060 - 2090	+90 to +140

Bien que le Scénario Pic ne comporte aucune mesure pour limiter les émissions de CO₂, sur le long terme, il conduira lui aussi à une stabilisation des concentrations en CO₂ dans l'atmosphère. Il est donc intéressant de pouvoir le situer par rapport aux scénarios de stabilisation du GIEC. Nous comparerons également ces scénarios à ceux de l'IEA, qui présente également différents niveaux de stabilisation des concentrations en CO₂ dans l'atmosphère sur le long terme.

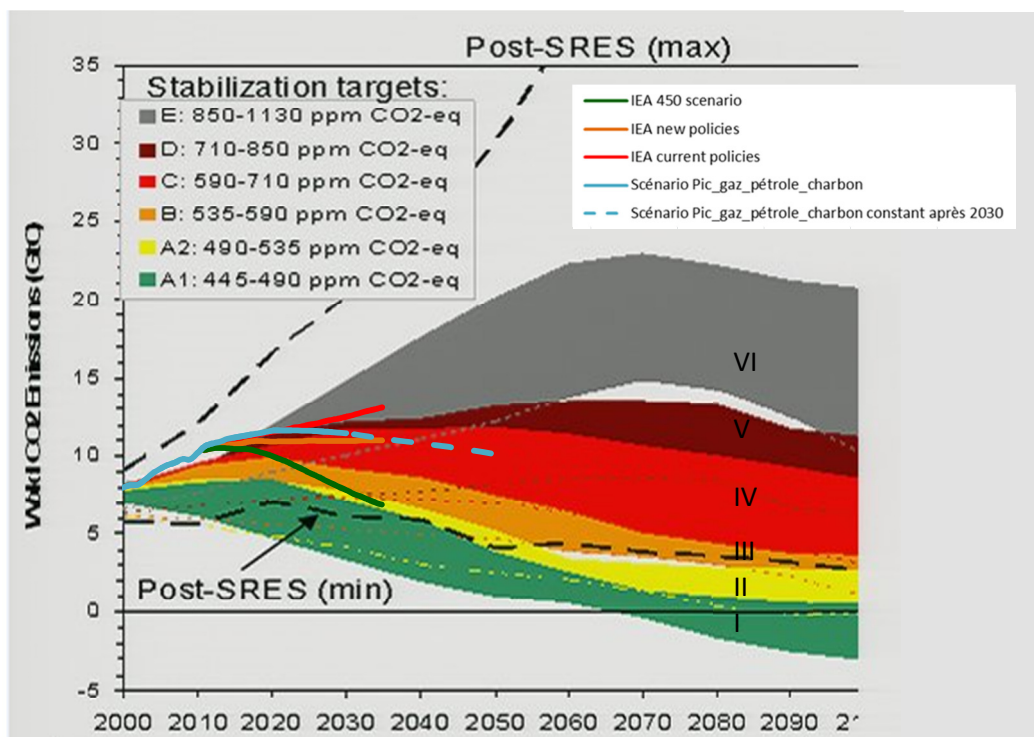
Comparons tout d'abord les scénarios de l'IEA avec les scénarios de stabilisation de l'AR4. Pour les Scénarios 450, New policies, et Current policies, la date des pics des émissions de GHG a lieu respectivement vers 2020, 2050, et 2070, les concentrations stabilisées en GHG s'établissent respectivement à 450, 660, et 950 ppm CO₂-eq, et les augmentations de température anticipées sont respectivement de 2°C, 3,6°C et 5,3 °C par rapport aux niveaux préindustriels (Figure 10). Les scénarios Current policies, New policies et Scenario 450 pourraient donc correspondre aux catégories, respectivement, I, IV, et VI des scénarios de stabilisation de l'AR4.

Figure 10 : Scénarios de l'IEA (WEO 2012). Trajectoires de la concentration en gaz à effet de serre selon les trois scénarios de l'IEA, avec la date des pics des émissions de gaz à effet de serre (GHG) indiquée (gauche) ; Distribution de probabilité d'augmentation de la température d'équilibre au-dessus des niveaux préindustriels (droite).



En comparant les scénarios Pic et AR4 au niveau de la date du pic des émissions de CO₂, du niveau de production de CO₂ en 2050 (Table 1), et de la trajectoire (Figure 11), le scénario Pic se situe dans les catégories III ou IV des scénarios de stabilisation du GIEC (535-710 ppm CO₂-eq, et **2.8-4.0 °C** d'augmentation supposée des températures à long terme). Le scénario Pic est également proche du scénario New policies de l'IEA jusqu'en 2030, s'en écarte vraisemblablement par la suite, le scénario Pic atteignant un pic d'émissions de GHG vers 2030 (si on considère que le pic des émissions de CO₂ entraînera celui des GHG), alors que New policies atteint son pic d'émissions de GHG vers 2050. Vu le niveau de stabilisation atteint par le scénario New policies, le scénario Pic pourrait être inférieur à 660 ppm CO₂-eq, avec une augmentation de température correspondante qui resterait inférieure à **3,6°C**.

Figure 11 : Trajectoires des scénarios d'émissions globales de CO₂ (énergie + industrie + occupation des sols) de l'IEA WEO2012 et du scénario Pic par rapport aux catégories de scénarios de stabilisation de l'AR4 indiquées en Table 1. Certaines catégories (zones colorées) se recouvrent, ce graphique n'illustre que partiellement les trajectoires envisagées par le GIEC pour les différentes catégories. Pour une illustration des trajectoires de chaque catégorie prise isolément, voir AR4¹². Les traits pointillés délimitent la zone des scénarios post-SRES.



IV.2.2 Scénarios d'atténuation et RCP de l'AR5.

Pour l'AR5, environ 900 scénarios d'atténuation ont été collectés. Pour pouvoir comparer ces scénarios divers (buts différents, intégration de tout ou partie des agents de forçage radiatif, dépassement temporaire – overshoot – ou non des concentrations visées à long-terme,...), le GIEC les a groupés selon plusieurs paramètres clés, le principal étant le niveau de forçage radiatif complet en 2100 (GHG + autre). La limite de 2100 a été prise pour éviter des suppositions supplémentaires sur les dynamiques après 2100. Le résultat de cette méthodologie est que les scénarios de l'AR5 sont

difficilement comparables avec ceux de l'AR4, qui présentent des valeurs d'équilibre sur le long terme plutôt que des valeurs en 2100¹⁶. Les trajectoires de ces scénarios sont représentées en Figure 13, et leurs caractéristiques sont reprises en Table 2.

Table 2 : Caractéristiques des scénarios d'atténuation contenus dans l'AR5. Pour tous les paramètres, les 10^{ème} et 90^{ème} centiles des scénarios sont indiqués¹⁷.

Concentration en CO ₂ (ppm) en 2100	Concentration en CO ₂ -eq (ppm) en 2100 (forçage radiatif complet ^a)	Position relative des RCPs	Augmentation globale de la température (°C) en 2100 au-dessus des niveaux préindustriels ^{b,c}	Emissions cumulées de CO ₂ (Gt CO ₂)		Changement dans les émissions globales de GHG ^d en 2050 (% de 2010)
				2011-2050	2011-2100	
390-435	430-480	RCP2,6	1.5-1.7	550-1300	630-1180	-72 to -41
425-460	480-530		1.7-2.1	860-1600	960-1550	-57 to +4 ^e
425-520	530-580		2.0-2.3	1070-1780	1170-2240	-47 to +7
500-545	580-650	RCP4,5	2.3-2.6	1260-1640	1870-2440	-38 to +24
565-615	650-720		2.6-2.9	1310-1750	2570-3340	-11 to +17
645-780	720-1000	RCP6,0	3.1-3.7	1570-1940	3620-4990	+18 to +54
810-975	>1000	RCP8,0	4.1-4.8	1840-2310	5350-7010	+52 to +95

a: GHGs, gaz halogènes, ozone troposphérique, aérosols, modification de l'albédo en fonction de l'occupation des sols.

b: valeur médiane ; d'autres chiffres sont également fournis dans l'AR5, qui incorporent des incertitudes supplémentaires sur le cycle du carbone et le système climatique, et présentent donc une plus large gamme de températures envisagées.

c: les températures indiquées ici sont pour 2100 ; elles ne peuvent donc pas être comparées aux températures à l'équilibre mentionnées dans l'AR4.

d: comprend l'ensemble des gaz de Kyoto (CO₂, CH₄, N₂O et gaz fluorés).

e: l'estimation haute est influencée par des scénarios ayant des émissions de CO₂-eq très nettement négatives (environ 40 GtCO₂-eq/an) sur le long terme.

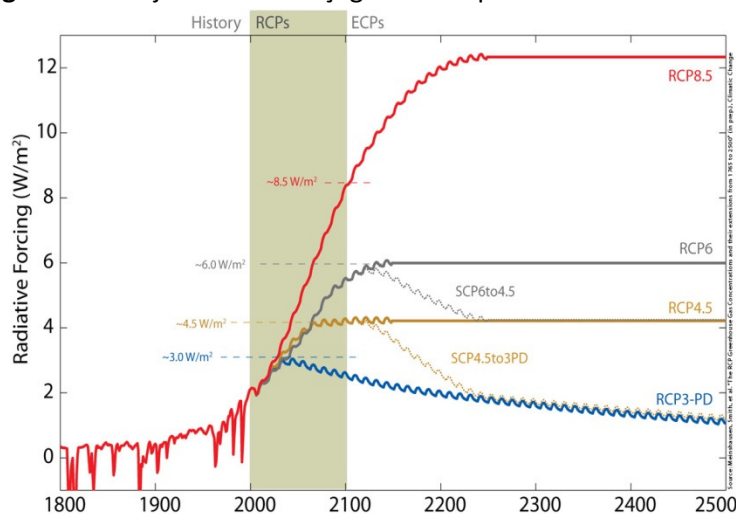
Table 3 : Caractéristiques des scénarios RCP contenus dans l'AR5¹⁸.

Scenario	Concentration en CO ₂ -eq (ppm) (basé sur forçage radiatif complet)	Augmentation globale des températures (°C) en 2100 au-dessus des niveaux préindustriels ^b	Forme de l'évolution des concentrations (et du forçage radiatif)
2,6	Pic à 490 ppm avant 2100 puis déclin	0,9-2,3	Pic et déclin
4,5	650 ppm, stabilisé après 2100	1,7-3,2	Stabilisation sans overshoot
6,0	850 ppm stabilisé après 2100	2,0-3,7	Stabilisation sans overshoot
8,5	>1370 ppm en 2100	3,2-5,4	En hausse

b: les valeurs en 2110 ont été établies par rapport à la période 1986-2005, auxquels 0,6°C ont été ajoutés pour tenir compte du réchauffement observé entre les périodes 1850-1900 et 1986-2005 (0.61 [0.55 to 0.67]°C).

En 2005, le GIEC exprima le besoin de disposer de nouveaux scénarios d'émission, bien avant la parution de l'AR5. En 2007, il fut décidé de préparer quelques scénarios représentatifs qui devaient être compatibles avec la gamme complète des scénarios de stabilisation, d'atténuation et de référence disponibles dans la littérature scientifique. Ce sont les scénarios RCP. Il y en a quatre, caractérisés par le forçage radiatif obtenu pour l'année 2100 : 2,6 ; 4,5 ; 6,0 et 8,5 W/m². Ces scénarios s'arrêtent en 2100, mais comme représenté en Figure 12, le forçage radiatif peut continuer à évoluer par la suite (après 2100, on parlera de scénarios ECP, *Extended Concentration Pathways*). La Table 2 et Figure 8 montrent où se situent les scénarios RCP par rapport aux scénarios, respectivement, d'atténuation et de référence de l'AR5. Quelques-unes de leurs caractéristiques sont représentées en Table 3.

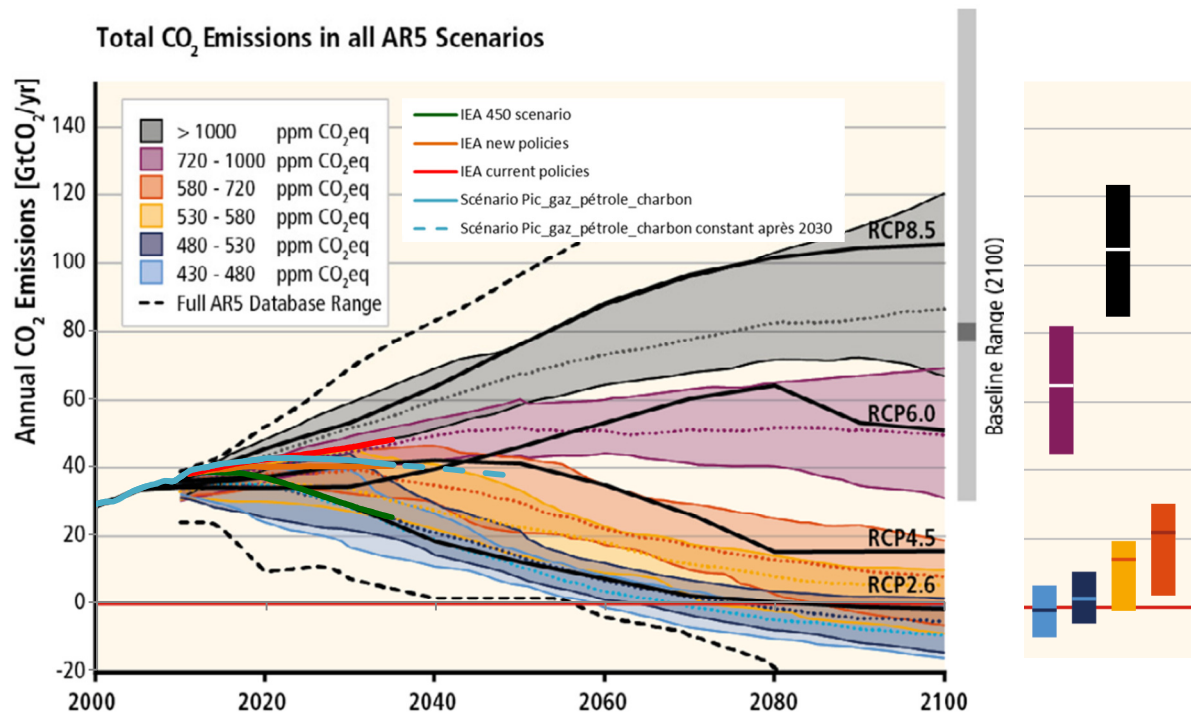
Figure 12 : Trajectoire du forçage radiatif pour les scénarios RCPs¹⁹.



Le scénario Pic se situe dans le haut des scénarios d'atténuation 580-720 ppm CO₂-eq (divisée en catégories 580-650 et 650-720 ppm CO₂-eq en Table 2) de l'AR5, tant au niveau des trajectoires (voir Figure 13), qu'en termes d'émissions de CO₂ cumulées (fossile+industrie+occupation des sols) entre 2011 et 2050 : 1070-1780 GtCO₂ pour les scénarios d'atténuation, et 1600 GtCO₂ pour le scénario Pic. Les scénarios 580-720 prévoient pour 2100 environ 500-615 ppm CO₂ et **2.3-2.9°C** d'augmentation des températures. Le scénario Pic suit également de près le scénario RCP4.5, qui prévoit **1,7-3,2°C** d'augmentation supposée des températures en 2100. Ces gammes de températures sont inférieures à la gamme des températures stabilisées (**2,8-4,0°C**) obtenues par comparaison avec l'AR4, étant donné l'inertie climatique.

Le scénario 450 de l'IEA suit la médiane des scénarios d'atténuation 430-480 ppm CO₂-eq, et suit également parfaitement le scénario RCP2.6, qui prévoient respectivement 1.5-1.7°C et 0,9-2,3°C d'augmentation supposée des températures en 2100. Le scénario 450 suppose des émissions de 900 GtCO₂ d'ici 2050, ce qui le situe également entre les valeurs de 550-1300 GtCO₂ considérées dans les scénarios d'atténuation 430-480 ppm CO₂-eq. On notera que ces scénarios ont des émissions de CO₂ qui deviennent nulles ou négatives d'ici la fin du siècle. On peut dès lors supposer que le scénario 450 de l'IEA implique une évolution similaire dans le futur.

Figure 13 : Trajectoires des scénarios d'émissions globales de CO₂ (énergie + industrie + occupation des sols) de l'IEA WEO2012 et PIC (voir annexe pour méthodologie) par rapport aux catégories de scénarios d'atténuation et de scénarios RCP de l'AR5. Les scénarios d'atténuation ont été groupés en 6 catégories et la valeur médiane ainsi que les 10^{ème} et 90^{ème} centiles sont représentés sur la droite. La barre grise représente la gamme complète des scénarios de référence en 2100 (environ 300 "baseline" scénarios)²⁰.



IV.3. Résumé des comparaisons en un tableau.

Bien que des difficultés à comparer les scénarios du GIEC, de l'IEA et de ce travail soient présentes, trois catégories de scénarios se détachent en fonction du niveau anticipé de CO₂ émis, reprises en Table 4 avec quelques caractéristiques. Les scénarios SRES et post-SRES, qui balayent les trois catégories, ont été omis. Le scénario Pic se situe dans la catégorie moyenne des scénarios d'émission.

Table 4 : Groupement des scénarios discutés dans ce travail, avec quelques caractéristiques.

Niveau d'émission de CO ₂	Scénarios	Conc. en CO ₂ (ppm) en 2100	Augmentation globale moyenne des températures (°C) en 2100 au-dessus des niveaux préindustriels	Conc. en CO ₂ (ppm) stabilisées	Augmentation globale moyenne des températures stabilisées (°C) au-dessus des niveaux préindustriels
bas	IEA scenario 450				2,0
	AR4 stabilisation I			350-400	2,0-2,4
	AR5 atténuation 430-480	390-435	1,5-1,7		
	AR5 RCP2,6		0,9-2,3		
moyen	Pic		1,7-3,2^a		2,8-4,0^a
	IEA new policies				3,6
	AR4 stabilisation III-IV			440-570	2,8-4,0
	AR5 atténuation 580-720	500-615	2,3-2,9		
	AR5 RCP 4,5		1,7-3,2		
élevé	IEA current policies				5,3
	AR4 stabilisation VI			660-790	4,9-6,1
	AR5 atténuation 720-1000	645-780	3,1-3,7		
	AR5 RCP 6,0-8,5		2,0-5,4		
	AR5 référence				

a : valeurs proposées par comparaison de la trajectoire d'émission de CO₂ PIC avec celles du GIEC et de l'IEA pour lesquelles existent des projections de température.

Conclusions

Le but de ce document était d'aborder l'effet que les contraintes physico-économiques associées aux ressources fossiles pouvaient avoir sur les productions d'énergies fossiles, et par extensions, sur les émissions de CO₂ et les prévisions de changements climatiques. Le scénario présenté dans ce travail, appelé Scénario Pic, considère que ces contraintes sont à présent suffisamment importantes que pour limiter les productions de pétrole, gaz, et charbon, qui plafonnent toutes les trois entre 2020 et 2030.

En termes d'émissions de CO₂, le scénario Pic se situe dans le bas des scénarios de référence (c.-à-d. sans politique climatique) du GIEC. Un grand nombre de scénarios de référence du GIEC semblent donc inaccessibles du point de vue de la production des énergies fossiles, et ce sans que ne soit prise la moindre mesure en faveur du climat. C'est particulièrement vrai pour le pétrole qui, des trois énergies fossiles, est celle dont les incertitudes concernant la disponibilité future sont les moins grandes. Cependant, le scénario Pic se situe vraisemblablement vers le milieu des scénarios de stabilisation du GIEC, soit 535-710 ppm CO₂-eq, et 2.8-4.0 °C d'augmentation supposée des températures à long terme. Le scénario Pic reste donc supérieur à l'objectif d'avoir 50% de chance de maintenir les hausses de température à moins de 2 °C sur le long terme, qui requiert une stabilisation des GHG à 450 ppm CO₂-eq dans l'atmosphère.

En comparant le Scénario Pic au scénario 450 de l'IEA, une référence parmi des possibles scénarios de stabilisation à 450 ppm CO₂-eq, il semble que pétrole et gaz suivent une trajectoire de production compatible avec l'objectif des 450 ppm CO₂-eq. Il s'agit d'une bonne nouvelle, d'autant plus que le scénario 450 de l'IEA ne reflète que partiellement le CO₂ produit par la combustion des énergies fossiles. Une partie du CO₂ produit n'est pas émise dans l'atmosphère mais est supposée être stockée via les techniques de Capture et Stockage du Carbone (techniques CCS). Dans le scénario 450, ce stockage est massif. Il représente de l'ordre de 10% des émissions de CO₂ liées à l'utilisation d'énergie en 2035 (2,5 GtC)²¹. Pour des raisons de coûts qui se répercuteront sur un prix de l'énergie qui aura déjà tendance à être poussé vers le haut par les contraintes physico-économiques pesant sur les productions, nous estimons que l'utilisation des techniques CCS restera très en deçà de l'objectif affiché par l'IEA.

Malgré les trajectoires relativement positives des productions de gaz et pétrole, le scénario Pic dévie largement de la trajectoire du Scénario 450 à cause du charbon. Comme l'objectif global en termes d'émissions n'est pas atteint, on peut se demander comment réagirait le politique si le scénario Pic avait lieu ? Il est peu probable que des mesures de politique climatique ne visent que le seul secteur charbonnier. D'autre part, la première des ressources à atteindre son pic est le pétrole. Si le pic pétrolier devait arriver par surprise (par manque d'anticipation), l'évolution des prix des énergies fossiles et de la situation économique prendront vraisemblablement le pas sur les objectifs climatiques dans les décisions politiques. Ce genre de situation a eu lieu lors des chocs pétroliers des années 1970s, où des reculs de politiques environnementales ont été observés le temps de la crise. Ici, le recul pourrait être plus long, car ce qui importe n'est pas le pic, mais le long déclin de production qui le suit. Cela pourrait cependant être atténué par le fait qu'il y aura de plus fortes incitations à réduire l'intensité énergétique (ou du moins pétrolière) de l'économie que par le passé, l'inaction étant garante de récession une fois le pic franchi.

Pour éviter de possibles discontinuités dommageables à la fois pour l'environnement, l'économie, et la société dans son ensemble, il est donc prudent d'anticiper les pics des ressources fossiles, et en particulier le premier d'entre eux, le pic pétrolier.

Annexe

	Production d'Énergie			Emissions de CO ₂ dues aux énergies fossiles (Gt CO ₂) ⁴				Emissions de CO ₂ (fossiles + industries) ⁵	Emissions de CO ₂ (fossiles + industries + Land) ⁶
	Oil ¹ Mb/j	Gas ² tcf	Coal ³ Gtce	Oil	Gas	Coal	TOTAL	TOTAL	TOTAL
1990	66	76	3,2	8,6	4,0	8,5	21,1	22,1	26,1
1991	66	77	3,1	8,5	4,1	8,2	20,9	21,9	26,0
1992	66	77	3,1	8,5	4,1	8,2	20,8	21,9	26,0
1993	67	78	3,0	8,6	4,2	8,0	20,7	21,8	26,0
1994	68	79	3,1	8,8	4,2	8,2	21,1	22,2	26,5
1995	69	80	3,2	8,9	4,2	8,4	21,6	22,7	27,0
1996	71	82	3,3	9,1	4,4	8,6	22,1	23,2	27,6
1997	73	82	3,3	9,4	4,4	8,7	22,5	23,6	28,1
1998	74	84	3,2	9,6	4,4	8,6	22,6	23,7	28,3
1999	74	86	3,2	9,5	4,6	8,5	22,6	23,7	28,3
2000	76	89	3,3	9,9	4,7	8,6	23,2	24,4	29,0
2001	76	91	3,4	9,8	4,8	9,0	23,7	24,9	29,6
2002	76	93	3,4	9,7	4,9	9,1	23,7	24,9	29,7
2003	78	96	3,7	10,1	5,1	9,7	24,8	26,1	30,9
2004	81	98	4,0	10,5	5,2	10,5	26,2	27,5	32,4
2005	83	101	4,2	10,7	5,3	11,1	27,1	28,5	33,5
2006	83	105	4,4	10,7	5,5	11,7	27,9	29,3	34,3
2007	82	107	4,6	10,6	5,7	12,1	28,4	29,8	34,9
2008	83	110	4,7	10,7	5,8	12,5	29,1	30,6	35,7
2009	82	108	4,8	10,6	5,7	12,6	28,9	30,4	35,6
2010	84	115	5,1	10,9	6,1	13,4	30,3	31,8	37,1
2011	84	121	5,6	10,9	6,4	14,7	32,0	33,6	38,7
2012	87	124	5,7	11,2	6,5	14,9	32,7	34,3	39,4
2013	89	126	5,7	11,4	6,7	15,1	33,2	34,9	39,8
2014	90	129	5,9	11,6	6,8	15,5	34,0	35,7	40,4
2015	91	132	6,0	11,7	7,0	15,8	34,4	36,2	40,8
2016	91	134	6,0	11,8	7,1	15,9	34,8	36,6	41,1
2017	92	137	6,1	11,9	7,3	16,1	35,3	37,0	41,4
2018	92	139	6,2	11,9	7,4	16,4	35,7	37,5	41,7
2019	92	142	6,3	11,9	7,5	16,7	36,1	37,9	42,0
2020	92	144	6,5	11,9	7,6	17,0	36,6	38,4	42,4
2021	92	146	6,5	11,9	7,7	17,1	36,7	38,6	42,4
2022	92	148	6,5	11,8	7,8	17,3	36,9	38,8	42,5
2023	91	149	6,6	11,8	7,9	17,3	37,0	38,9	42,5
2024	91	151	6,6	11,7	8,0	17,4	37,1	39,0	42,4
2025	90	152	6,6	11,6	8,1	17,5	37,2	39,1	42,4
2026	90	153	6,7	11,6	8,1	17,6	37,3	39,1	42,3
2027	89	154	6,7	11,5	8,2	17,7	37,3	39,1	42,2
2028	88	154	6,7	11,4	8,2	17,8	37,3	39,2	42,1
2029	88	155	6,8	11,3	8,2	17,9	37,4	39,2	42,0
2030	87	155	6,8	11,2	8,2	18,0	37,4	39,2	41,8

2031	86	155	6,8	11,1	8,2	18,0	37,2	39,1	41,6
2032	85	154	6,8	11,0	8,2	18,0	37,1	39,0	41,3
2033	84	154	6,8	10,9	8,2	18,0	37,0	38,8	41,0
2034	84	153	6,8	10,8	8,1	18,0	36,9	38,7	40,7
2035	83	152	6,8	10,7	8,1	18,0	36,7	38,5	40,4
2036	82	151	6,8	10,6	8,0	18,0	36,5	38,4	40,3
2037	81	149	6,8	10,5	7,9	18,0	36,4	38,2	40,1
2038	81	148	6,8	10,4	7,8	18,0	36,2	38,0	39,9
2039	80	146	6,8	10,3	7,7	18,0	36,0	37,8	39,7
2040	79	144	6,8	10,2	7,6	18,0	35,8	37,6	39,5
2041	79	141	6,8	10,1	7,5	18,0	35,6	37,4	39,2
2042	78	139	6,8	10,1	7,4	18,0	35,4	37,1	39,0
2043	77	137	6,8	10,0	7,2	18,0	35,2	36,9	38,8
2044	77	134	6,8	9,9	7,1	18,0	34,9	36,7	38,5
2045	76	131	6,8	9,8	7,0	18,0	34,7	36,4	38,3
2046	75	128	6,8	9,7	6,8	18,0	34,5	36,2	38,0
2047	75	125	6,8	9,6	6,6	18,0	34,2	35,9	37,7
2048	74	122	6,8	9,5	6,5	18,0	34,0	35,7	37,5
2049	73	119	6,8	9,4	6,3	18,0	33,7	35,4	37,2
2050	72	116	6,8	9,3	6,2	18,0	33,4	35,1	36,9

1 : Production d'huiles à l'entrée du raffinage ; données interpolées à partir des moyennes en 2020, 2030 et 2050 obtenues lors de l'enquête Delphi menée dans le cadre de PIC.

2 : Production de gaz naturel « brut moins réinjecté » extraite des projections PIC de Jean Laherrère, et réduites de 8% pour obtenir des estimations de gaz sec comparables à celles de l'IEA.

3 : Production de charbon extraite du BP Energy Outlook 2030 (publié en 2013) de 2012 à 2030 ; production considérée comme constante par la suite.

4 : Un facteur de conversion unique a été utilisé pour convertir les productions d'une énergie fossile donnée en émissions de CO₂, c.-à-d. que l'erreur introduite par l'évolution de la composition (rapport C/autres éléments) des trois énergies fossiles entre 2010 et 2050 est supposée peu significative en regard des incertitudes actuelles (sur les volumes de production et compositions actuelle et future des énergies fossiles). Les facteurs de conversion ont été obtenus à partir des données IEA de production et d'émissions de CO₂ des énergies fossiles pour l'année 2010 (WEO2012) : 0,13 pour oil Mb/j → GtCO₂/an ; 0,053 pour gas tcf/an → GtCO₂/an ; 2,6 pour coal Gtce/an → GtCO₂/an.

5 : Les émissions de CO₂ générées par des processus industriels – hors énergie (fermentation des sucres en alcool, production de chaux et ciments,...) étiEAnt équivalentes à 5% des émissions de CO₂ énergie en 2010 (IEA WEO 2012). Nous considérons ce rapport constant d'ici 2050 (approximation similaire au scénario Current Policies de l'IEA).

6 : Les changements de l'utilisation des sols et de la couverture végétale contribuent également aux émissions de CO₂, dont les estimations sont très incertaines (1,6 ± 1 GtC en 1990). Les scénarios SRES du GIEC, pour pouvoir être comparables, utilisent des émissions standardisées communes, de 1,1 GtC (4,0 GtCO₂) en 1990 et 1,0 GtC (3,7 GtCO₂) en 2000. Pour 2020, les émissions varient entre 0 et 3 GtC selon les scénarios, avec une valeur médiane de 1,1 GtC (4,0 GtCO₂) ; Pour 2050, les émissions varient entre -0,7 et 1,2 GtC selon les scénarios, avec une valeur médiane de 0,5 GtC (1,8 GtCO₂). Dans les scénarios avec déforestation continue, les émissions augmentent initialement puis déclinent à mesure que le stock de forêts s'épuise, alors que dans les scénarios plus environnementaux, les émissions deviennent négatives, les modifications de gestion des territoires devenant des puits de carbone, notamment via la reforestation. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=118>. Les estimations de l'IEA (WEO 2012, p246)

utilisées dans ses 3 scénarios sont assez comparables à celles du GIEC: 5,3 Gt CO₂-eq (principalement CO₂) en 2010, 4,0 Gt en 2020, et 1,9 Gt en 2035. Pour PIC, les valeurs ont été interpolées à partir des valeurs IEA pour 2010, 2020 et 2035, et celles du GIEC (médianes) pour 1990 et 2050.

Références

¹ Pour un aperçu des critiques des scénarios SRES du GIEC sous l'angle des contraintes à la production des énergies fossiles, voir par exemple M. Höök et X. Tang, Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change – A review, *Energy Policy* 52, 797-809, 2013.

² Pour extraire de l'énergie de son environnement, il faut en dépenser une certaine quantité. Le taux de retour énergétique est le rapport entre l'énergie obtenue et l'énergie dépensée.

³ IFP Energies Nouvelles, Panorama 2015, Nouvelles découvertes de pétrole et de gaz conventionnels, décembre 2014.

⁴ Il s'agit des réserves techniques prouvées et probables de pétrole conventionnel uniquement, actualisées rétroactivement. Ces données n'ont rien à voir avec les réserves prouvées, qui sont des données politiques, mélangeant conventionnel et non conventionnel, et sont actualisées l'année en cours. Le message véhiculé par ces deux catégories de réserves est fondamentalement différent. Pour de plus amples informations, voir le Rapport d'enquête publique du Parlement wallon sur le pic pétrolier et ses implications pour la Wallonie, 2014. https://hosting.umons.ac.be/php/aspo/public_html/EPPW/pdf/EPPW.pdf

⁵ Rapport d'enquête publique du Parlement wallon sur le pic pétrolier et ses implications pour la Wallonie, 2014. https://hosting.umons.ac.be/php/aspo/public_html/EPPW/pdf/EPPW.pdf

⁶ Jean Laherrère, CLARMIX, Prévisions pétrole et gaz 1900-2100, 22 octobre 2013, http://aspoFrance.viabloga.com/files/JL_Clarmix-Previsions1900-2100.pdf

⁷ CLARMIX, Enquête Delphi sur les prévisions de pétrole auprès d'experts pétroliers des secteurs institutionnels, académiques et des industries pétrolières, principalement des membres d'ASPO France mais aussi des membres extérieurs, 2013, communication privée.

⁸ BP Energy Outlook 2030, 2013.

⁹ Contribution du Groupe de travail I, II, III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 2007, p44. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf ou http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/fr/mains3.html

¹⁰ IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001, Working Group III: Mitigation, p122. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/pdf/2.pdf ou <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=72>

¹¹ Working Group III contribution to the IPCC 5th Assessment Report "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", 2014, chapter 6, Assessing Transformation Pathways, p18. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf

¹² J. Laherrère, Estimates of oil reserves. Paper Presented at the EMF/IEA/IEW Meeting IIASA, Laxenburg, Austria, 19 June 2001. <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/ECS/IEW2001/pdf/Papers/Laherrere-short.pdf>

¹³ Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p175. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter3.pdf> ou http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch3s3-1-2.html

¹⁴ Contribution of Working Groups I,II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Synthesis report, Figure 6.2. http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/

¹⁵ Contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC - L'atténuation du changement climatique, Résumé technique, 2007, p42-43. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-ts-fr.pdf> ou http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/fr/tssts-3-2.html

¹⁶ Working Group III contribution to the IPCC 5th Assessment Report "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", 2014, chapter 6, Assessing Transformation Pathways, p21. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf

¹⁷ Working Group III contribution to the IPCC 5th Assessment Report "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", 2014, chapter 6, Assessing Transformation Pathways, p22 et p24. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf

¹⁸ TOWARDS NEW SCENARIOS FOR ANALYSIS OF EMISSIONS, CLIMATE CHANGE, IMPACTS, AND RESPONSE STRATEGIES, Technical Summary, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC EXPERT MEETING REPORT, 19–21 September, 2007, Noordwijkerhout, The Netherlands, p13. <http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios.pdf>

¹⁹ Website of Potsdam Institute for Climate Impact Research, <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/>

²⁰ Working Group III contribution to the IPCC 5th Assessment Report "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", 2014, chapter 6, Assessing Transformation Pathways, p25. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf

²¹ IEA WEO 2012, p253