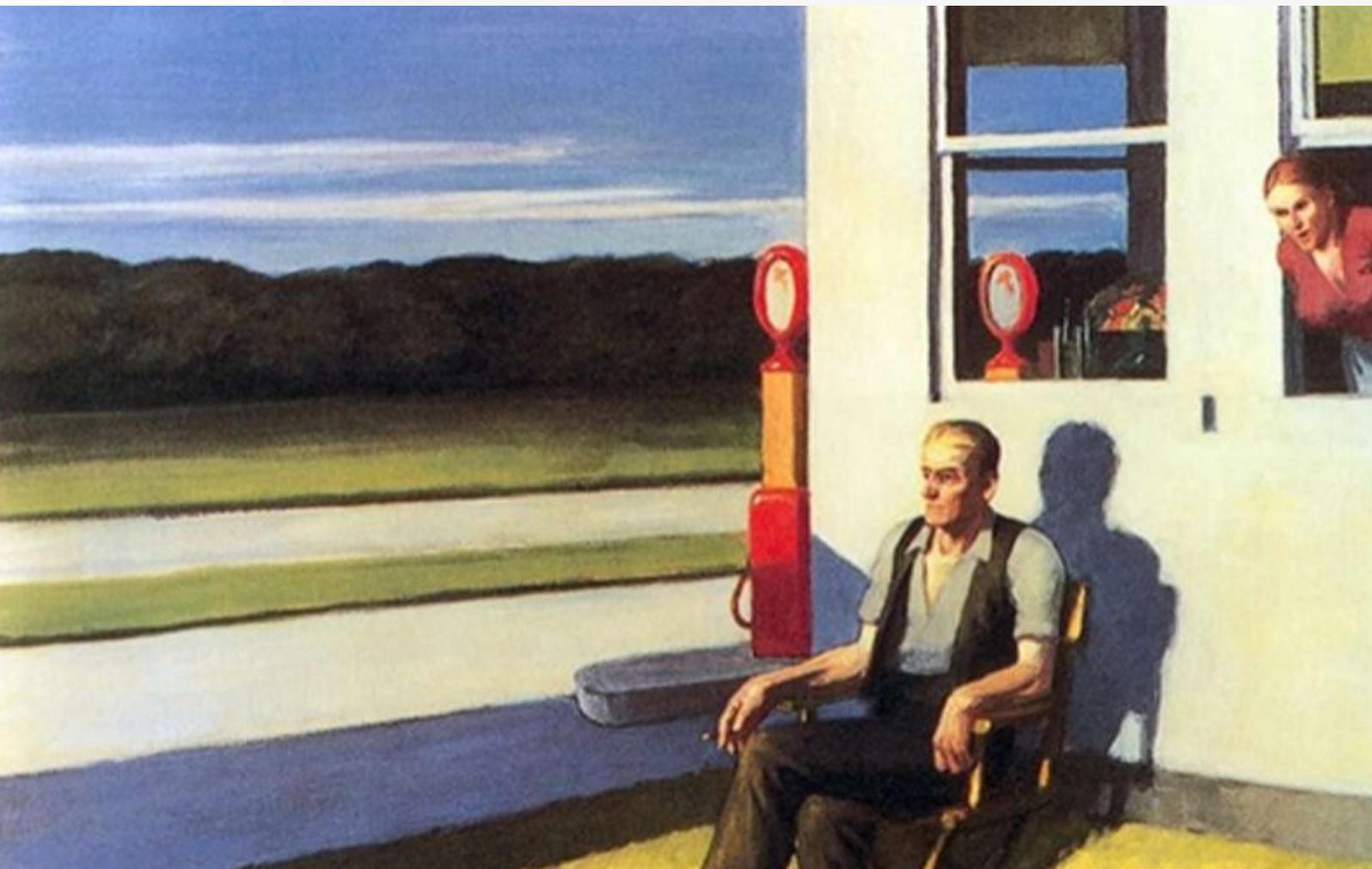


2018-2019

L'ÉPUISEMENT DES ÉNERGIES FOSSILES, FACTEUR LIMITANT DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ?



ROUTE À QUATRE VOIES, EDWARD HOPPER, 1956, COLLECTION PRIVÉE

OLIVIER RAGUENES
SOUS LA DIRECTION DE GILLES RAMSTEIN

Université de Paris-Saclay

En partenariat avec l'**Université de Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ)**, et
avec l'**École Supérieure de Journalisme de Lille (ESJ-Lille)**.

Master 2 "Sciences de la Terre et des Planètes, Environnement"

Mention : "**Appréhender les Changements Climatiques, Environnementaux
et Sociétaux**" (ACCES)

RAGUENES Olivier

L'épuisement des énergies fossiles, facteur limitant du réchauffement climatique ?

2019

Sous la direction de Gilles Ramstein

Remerciements :

Les remerciements n'ont jamais été mon point fort. Toutefois, je remercie bien évidemment Gilles Ramstein pour son accompagnement. J'en profite pour remercier les formateurs du Master 2 ACCES pour leurs apports.

Aussi, je remercie toutes les personnes qui ont répondu à mes sollicitations, parfois renouvelées à plusieurs reprises.

Enfin, je remercie Léa pour sa bienveillance et son esprit critique, ainsi que Thomas, Juliette, et Anna, qui ont aidé à corriger et rectifier mon article.

Introduction :

Depuis le début de la mobilisation climatique, marquée par la signature de plusieurs accords engageants, comme celui de Kyoto, puis plus récemment ceux de Paris en 2015, les émissions de GES (gaz à effet de serre) ne cessent de croître, suivant la hausse de la consommation d'énergie fossile à l'échelle globale (+2% en 2018 [BP, 2019]). Le réchauffement climatique d'origine anthropique a déjà été mesuré à +1°C à l'échelle globale depuis la période 1850-1900, et les modélisations du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) font craindre une hausse bien plus importante d'ici 2100. La trajectoire climaticide empruntée par nos sociétés s'inscrit dans les *scenarii "business-as-usual"* (ou "maintien du *statu quo*") du GIEC, selon lesquels nous n'opérerons pas d'inflexion de nos émissions de GES malgré les bouleversements climatiques à l'œuvre.

Notre croissance économique, industrielle et territoriale, est jusqu'à présent liée à l'exploitation des énergies fossiles carbonées : gaz, charbon et pétrole, qui permettent notamment la production et le déplacement, éléments vitaux de nos sociétés. Ainsi, nous sommes à la fois contraints mais aussi stimulés par le devoir impérieux de réduire drastiquement nos émissions de GES et donc de s'affranchir du recours systématique aux énergies fossiles.

Pourtant, les projections d'extraction des énergies carbonées laissent penser que cette trajectoire d'émissions n'est pas soutenable. Le progressif épuisement des réservoirs souterrains est un sujet d'étude résumé parfois à la prédiction de la date du "pic pétrolier" (ou "*peak oil*"). Des organismes internationaux et la littérature scientifique issue des études en géologie et en énergie nous informent sur l'incertitude de la durabilité de l'extraction des énergies fossiles. L'exploitation de nos 100 millions de barils de pétrole quotidiens reste particulièrement mieux documentée par rapport au charbon et au gaz, d'une part parce que c'est la principale source d'énergie mondiale, mais surtout parce que de son utilisation dépend le reste des exploitations, le pétrole représentant 95% de l'énergie utilisée pour le transport (BP, 2018).

Le croisement du réchauffement climatique et des études pétrolières relève de la "science post-normale", pour reprendre la formule du philosophe des sciences Jerome Ravetz. Car la déplétion énergétique ne peut se mesurer en laboratoire, ni être démontrée de façon empirique. Selon Ravetz, dans ces domaines, "*les faits sont incertains, les valeurs en débat, les enjeux forts, et les décisions urgentes*" (Ravetz, 2004). Les faits sont incertains dans la mesure où les quantités de pétrole extraites du sol sont mesurées selon les déclarations des différents pays, de même que leurs réserves ; les valeurs sont en débat car les classifications divergent selon l'organe de publication ; les enjeux sont forts car ces questions touchent au fonctionnement de notre société ainsi qu'à l'habitabilité de la planète dans les décennies à venir ; et les décisions urgentes car les délais, tant pour la question climatique que pour le déclin pétrolier, sont très courts pour envisager sereinement et de manière globale une transition vers un nouveau monde résilient face à ces problématiques.

Ce travail sera l'occasion de croiser les données des études climatiques et géologiques, pour tenter de déterminer dans un premier temps si l'épuisement des énergies fossiles est imminent ou

incertain. Puis, à partir de l'élaboration de *scenarii* énergétique et climatique, nous tenterons d'envisager la soutenabilité des trajectoires les plus climaticides. Enfin, nous reviendrons sur la nécessité de médiatiser cette hypothèse, et sur la difficulté de publication d'articles traitant de cet enjeu.

Sommaire :

Introduction (p.3)

Sommaire (p.4)

Résumé (p.5)

I) Énergies fossiles : un avenir incertain (p.6)

- 1) Une nomenclature non-standardisée
- 2) Une faible disponibilité des données
- 3) Le pic pétrolier
- 4) L'essor du non-conventionnel : la mise en déroute de la théorie du pic pétrolier ?
- 5) Le TRE : le pétrole bientôt gouffre énergétique ?
- 6) L'importance de la qualité du pétrole
- 7) Les projections actuelles
- 8) Le charbon

II) Des *scenarii* climatiques très "*fossilophages*" (p.15)

- 1) De l'alimentation du réchauffement climatique
- 2) Des modélisations de plus en plus complètes
- 3) L'approche par budget carbone
- 4) Croiser les données pour avancer ?

III) De l'intérêt du traitement journalistique de ce sujet (p.22)

- 1) Apprendre des projections parcellaires
- 2) Mieux connaître un phénomène pour mieux le traiter
- 3) Un traitement médiatique irrégulier
- 4) Les réactions

Conclusion (p.26)

Bibliographie (p.27)

Annexes (p.32)

- 1) Article 1 (p.32)
- 2) Article 2 (p.34)
- 3) Interviews (p.36)

Résumé :

Le réchauffement climatique, déjà mesuré à +1°C à l'échelle globale par rapport à la seconde moitié du XIXème siècle, est un phénomène provoqué par l'accentuation des émissions de gaz à effet de serre (GES), du fait des activités humaines. Par leur développement, les sociétés industrielles ont recours aux énergies fossiles : pétrole, charbon et gaz en tête, dont l'usage permet à l'économie de croître. Le revers de ces ressources accessibles et pratiques se trouve dans les conséquences de leur combustion.

Les émissions de GES, qui n'ont pas cessé de croître malgré les accords signés par de nombreux pays, sont scrutées par les organes scientifiques spécialisés dans l'étude du climat. Le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) est celui qui bénéficie de la plus large écoute médiatique, et les travaux publiés régulièrement font figure de référence lorsqu'est abordée la question du réchauffement climatique. Les projections climatiques, réalisées à partir de modèles, s'appuient sur différents paramètres, dont l'évolution des émissions de GES.

Dans les modèles actuels, seuls les choix politiques et énergétiques des sociétés sont questionnés pour envisager plusieurs trajectoires d'émissions climaticides. Or, certaines études scientifiques, en géologie pétrolière notamment, invitent à réenvisager les réserves d'énergie fossile. Ainsi, leur disponibilité ne serait pas infinie au cours du siècle, mais soumise à des limites géologiques. Certaines auteurs considèrent que les *scenarii* qui font craindre un monde à +7°C d'ici 2100 ne sont pas réalistes car nous aurons, d'ici-là, un accès restreint aux énergies fossiles.

La question du "pic pétrolier", déconsidérée dans les années 2000 du fait de l'exploitation nouvelle des pétroles non-conventionnels, est, depuis quelques années, de retour dans les articles scientifiques. Bien que la consommation mondiale d'énergie fossile - entraînant donc la hausse de la concentration atmosphérique de GES - continue de croître, les projections de géologues pétroliers et d'institutions officielles en envisagent un déclin progressif. Cette évolution ne serait alors pas dictée par des choix politiques, mais par des contraintes physiques de difficulté d'exploitation des ressources.

Plusieurs études ont tenté de conjuguer modélisation climatique et données géologiques. Leurs conclusions sont semblables. Ainsi, avec les réserves (les énergies exploitables) dont les sociétés disposent, les émissions de GES liées à la combustion fossile connaîtraient une limite, générant un réchauffement climatique de l'ordre de 2,5 à 3°C. Ceci dit, d'autres éléments que la combustion du pétrole, du charbon ou du gaz, sont à prendre en compte dans la modélisation climatique et dans les émissions futures de GES, comme l'usage des sols ou la fonte du pergélisol.

Si les émissions de GES venaient à baisser, ce serait une bonne nouvelle pour celles et ceux qui se mobilisent contre le réchauffement climatique. Pour autant, le fonctionnement de nos sociétés dépend de la combustion des énergies fossiles, et un moindre approvisionnement constituerait un péril économique et social de premier plan. Le traitement médiatique de ces questions apparaît nécessaire pour saisir les enjeux de nos sociétés, dans un monde réchauffé mais sevré de pétrole.

I) Énergies fossiles : un avenir incertain

1) Une nomenclature non-standardisée :

Les mots ont leur importance lorsque l'on s'intéresse aux énergies fossiles. Les ressources ne sont pas les réserves, et le *shale oil* n'est pas le *oil shale* (Laherrère, 2018). Il apparaît essentiel de bien définir les termes employés. Ainsi, lors de l'étude approfondie de ce sujet, plusieurs définitions doivent être explicitées. Des erreurs ou des incompréhensions peuvent être liées aux objets étudiés, et il apparaît central d'harmoniser les valeurs pour un traitement plus fin de la question.

Les différents organes d'information : ministères, agence internationale de l'énergie, entreprises de prospection... n'ont pas forcément un vocabulaire uniformisé, il faut donc être vigilant avec l'étude des différentes sources. Même le nom donné aux différents organes officiels est sujet à erreur. En effet, l'Agence Internationale de l'Énergie, raccourcie en AIE en français, se raccourcit en IEA en anglais, alors que l'Agence d'information sur l'énergie qui est un organe gouvernemental états-unien, se raccourcira en EIA dans la littérature anglo-saxonne.

Tout d'abord, au sujet des différents produits pétroliers, les réserves de pétrole sont les quantités considérées récupérables, à un moment précis, dans les conditions technique et au prix du baril (Murray, 2016). Alors que les ressources sont en réalité l'ensemble du pétrole présent sous la surface terrestre, y compris ce qui est trop complexe ou trop coûteux à extraire.

Ensuite, les réserves ultimes regroupent l'ensemble de ce que nous sommes en capacité d'extraire. Ensuite, l'on retrouve souvent la mention "2P", qui regroupe les réserves prouvées et les réserves probables.

Aussi, il est de coutume de séparer le pétrole conventionnel, pour lequel l'industrie utilise la pression naturelle des puits pour l'extraire du sol, du pétrole non-conventionnel qui regroupe différents produits pour lesquels les techniques d'extraction sont plus complexes : biocarburants, pétrole d'eau profonde ("*deep water*"), sables bitumineux ("*oil sands*" ou "*tar sands*"), schiste bitumineux ("*oil shale*"), huile de schiste ("*shale oil*"), pétrole de réservoir étanche ("*tight oil*" ou "*light tight oil*"), ou encore le condensat, qui est du gaz naturel qui se condense une fois remonté à la surface, tantôt considéré comme du pétrole très léger, tantôt comme du gaz.

2) Une faible disponibilité des données :

La discordance au sujet des institutions de tutelle ne se limite pas au vocabulaire. Les données publiées par les agences officielles sont parfois mises en doute par les spécialistes du secteur. C'est pourquoi de nombreuses agences privées comme Rystad prospèrent en publiant des données qui permettent d'y voir plus clair quant aux réserves pétrolières. Il ne s'agira pas ici de revenir dans le détail sur les informations ou les classifications choisies par l'AIE ou par tout autre organe officiel.

Par le passé, les réserves proclamées par tel ou tel pays se sont avérées fausses et intéressées, selon les enjeux géopolitiques du moment. Ainsi, entre 1985 et 1991, les pays producteurs de pétrole membres de l'OPEP (organisation des pays exportateurs de pétrole) ont multiplié par 1,9 le total de leurs réserves "prouvées" (Auzanneau, 2010), sans pour autant que la prospection pétrolière ait particulièrement été performante. Les données gouvernementales sont ainsi à prendre avec précaution lorsqu'il est question des réserves pétrolières.

Cependant, les données utilisées par les scientifiques traitant de ce sujet sont majoritairement fournies par les organes officiels, qu'ils soient publics (ex : AIE) ou privés (ex : BP), quitte à les mettre en doute. Le croisement des données est là aussi central pour avoir un panorama fiable de la production pétrolière.

Au-delà des déclarations d'entreprises pétrolières qui souhaitent souvent se montrer confiantes, des débats peuvent exister au sein même d'un courant de pensée comme les "picistes". Ainsi, la production vénézuélienne est l'objet d'un débat entre certains qui pensent comme l'ingénieur pétrolier Jean Laherrère que la production est contrainte pour raisons politiques malgré de grandes réserves (interview, 2019), alors que Bauquis, pourtant lui aussi membre de l'ASPO (*association for study of peak oil and gas*) considère au contraire que les réserves sont très faibles (Bauquis, 2019).

Deux dimensions sont à appréhender pour évoquer les difficultés de la production pétrolière à un endroit et à un moment donnés : ceux *below ground* (sous le sol, autrement dit : l'aspect géologique), et ceux *above ground* (au-dessus du sol, autrement dit : les aspects politiques). Ainsi, une réserve de pétrole peut arrêter d'être exploitée si les conditions politiques ne permettent pas l'extraction dans de bonnes conditions (fiscalité, stabilité politique, militantisme, relations internationales). Mais une réserve de pétrole peut aussi être épuisée car elle se vide.

3) Le pic pétrolier :

Le "pic pétrolier" (ou "*peak oil*") est défini par Matthieu Auzanneau et Bernard Durand (2019) comme "*le point critique à partir duquel un champ de pétrole, ayant épuisé à peu près la moitié de ses réserves exploitables, est voué à terme à un déclin irrémédiable*". Des exemples passés à l'échelle d'un pays ou d'un gisement peuvent permettre de valider cette approche. La production pétrolière en mer du Nord, qui constitue la principale région productrice de pétrole en Europe de l'Ouest, a connu une trajectoire représentative de ce que peut être le pic pétrolier.

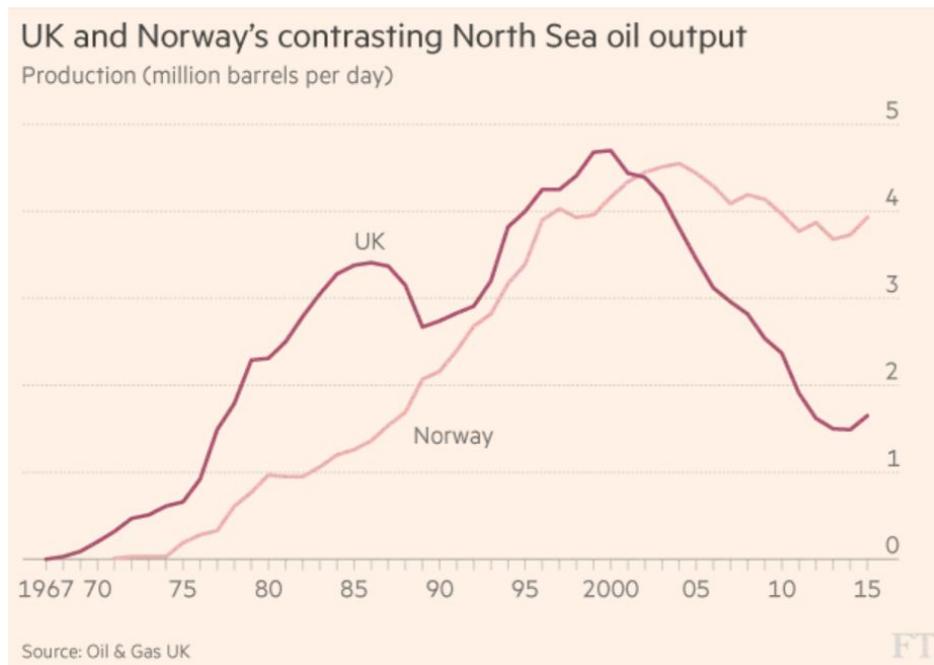


Figure 1 : Production pétrolière en mer du Nord, entre 1967 et 2015 (données : Oil & Gaz UK, graphique : Financial Times)

Les réserves de la mer du Nord, exploitées à partir des années 1970, sont considérées comme des modèles de pic pétrolier (Figure 1). La production a connu une croissance très forte, avant de plafonner, puis de descendre, très rapidement pour le Royaume-Uni, et plus timidement pour la Norvège. Pour autant, le moment du pic ne signifie pas l'arrêt total de la production, mais son déclin, dont la vitesse varie. Le pic pétrolier mondial (tous pétroles confondus), dont on ignore encore la date, ne verra pas la fin de l'exploitation pétrolière, mais simplement le début de son déclin, et donc le début d'une certaine tension sur le marché de l'énergie et d'une incertitude sur l'approvisionnement.

Malgré le passage du pic, la dynamique récente est positive pour l'extraction pétrolière en mer du Nord. L'industrie a réussi à abaisser ses coûts de production de 45% en moyenne ces dernières années (Ward, 2016), permettant donc de redémarrer l'exploitation bien que l'extraction y soit deux moins rentable que dans le Golfe du Mexique par exemple. Après avoir extrait 43 milliards de barils du fond de la mer du Nord, les réserves sont estimées entre 10 et 20 milliards de baril restants, ce qui implique un développement futur très limité. En dépit d'un rebond de la production et des gains en efficacité pour les industriels, le pic est bel et bien passé. Pis, la production pourrait même décliner de nouveau à partir de 2019 (Bouso, 2019).

Depuis le travail de Marion King Hubbert en 1949, de nombreux spécialistes de l'extraction des énergies fossiles ont tenté d'alerter sur la menace qui pesait sur l'industrie pétrolière et sur la société. Le "peak oil" est une théorie qui est considérée valable pour d'autres ressources naturelles également, et qui constitue toujours le sujet de vifs débats. Certains considèrent que, selon la loi de l'offre et de la demande : la rareté d'une ressource finie entraînera la hausse de son prix et donc facilitera son extraction. D'autres, *a contrario*, estiment que la progressive rareté d'une ressource entraînera plutôt

une tension sur le marché pour l'accaparement de celle-ci, ainsi qu'un détournement des consommateurs face aux difficultés d'approvisionnement. Ce qui est certain, c'est que les ressources naturelles comme le pétrole, le gaz et le charbon, sont considérées comme finies : elles ne sont pas recyclables, leurs réserves sont limitées géologiquement car leurs formations sont liées à des processus géologiques extrêmement longs à l'échelle du temps humain.

Bien que l'inquiétude se porte sur le pic mondial de production pétrolière, certains pays producteurs connaissent eux aussi le phénomène à leur échelle. Ainsi, après la Syrie (1997), le Yémen (2000) ou le Mexique (2004), le pic de production de pétrole conventionnel de la Russie est attendu pour 2025 selon l'AIE (WEO, 2018), et pour 2021 selon son ministre de l'énergie Alexander Novak (interview, 2018). Ce pays dispose de réserves de pétrole non-conventionnel pour l'instant non exploitées, mais qui, selon l'entreprise Gazprom, pourraient être extraites à partir de 2022-2023. Plusieurs éléments bloquent cette exploitation jusqu'alors : les exportations de pétrole conventionnel russes sont suffisantes et assez faciles tant la demande reste forte, le coût de l'exploitation de ce pétrole de roche-mère demeure pour l'instant trop important, et enfin, les technologies nécessaires ne sont pour lors pas encore accessibles aux exploitants russes. Si ce pétrole était aussi intéressant pour les *majors* russes que le pétrole conventionnel, celles-ci auraient déjà commencé à exploiter ces puits, estimés au mieux à 60 milliards de tonnes (soit, très approximativement, un peu moins de 9 ans de la consommation actuelle mondiale).

L'ASPO regroupe de nombreux ingénieurs pétroliers, géologues, anciens de l'industrie d'extraction, universitaires... autour de l'étude des pics des différentes énergies fossiles. Depuis plusieurs années, plusieurs de ses branches européennes demeurent les organes les plus actifs, avec des conférences et des publications d'études considérées comme des ressources académiques, au vu de citations fréquentes dans des articles de recherche parus au sein de revues à comité de lecture (Hall, 2014). Parmi les figures de cette association, Jean Laherrère, ancien ingénieur pétrolier chez Total, publie très régulièrement des articles sur le site de l'ASPO.

Des ressources académiques existent également. L'article le plus emblématique, paru en 1998 dans *Scientific American*, écrit par Campbell et Laherrère et intitulé "*The end of cheap oil*", a marqué un tournant dans la prospection pétrolière. Anticipant le pic de la production pétrolière dite conventionnelle, cet article a réussi, avec une précision satisfaisante, à rendre compte des limites de l'extraction mondiale à l'horizon 2005. Bien plus tard, en 2018, l'Agence internationale de l'énergie a considéré que : "*la production mondiale de pétrole conventionnel a atteint son pic en 2008 à 69,5 millions de barils par jour, et a baissé depuis de 2,5 MB/J*". Cependant, bien que la production de pétrole conventionnel stagne depuis le milieu des années 2000, la production de pétrole non-conventionnel, surtout en Amérique du Nord, a connu un "*boom*" sans précédent depuis, permettant à la production pétrolière mondiale de continuer à croître. Ce "*nouveau*" pétrole, connu de longue date par les géologues mais inexploité jusqu'alors, a mis en déroute nombre de prévisions. Des prédictions faites par le passé se sont avérées mauvaises, n'envisageant pas comme possible le recours aux énergies non-conventionnelles.

L'essor de l'exploitation du gaz ces dernières années, notamment dans la production d'électricité, a également entamé les réserves considérées jusqu'alors. Le gaz ne dispose pas des mêmes avantages pour le transport et la sécurité de son usage. Toutefois, la production gazière n'a pas encore connu son pic, bien qu'il soit envisagé par Jean Laherrère à hauteur de 18 millions de barils par jour (contre 15 aujourd'hui) (Laherrère, 2019), alors que l'Agence internationale de l'énergie (WEO, 2018), plus optimiste sur le devenir du gaz, envisage un pic à 21 Mb/J en 2040. Ainsi, son développement relatif dans les années à venir ne permettra pas de compenser le déclin du pétrole dont la consommation quotidienne est de 98 MB/J.

Les *majors* pétrolières poursuivent les forages et l'exploitation des énergies fossiles conventionnelles et non-conventionnelles. Pour autant, face à la déplétion à venir, certaines cherchent à diversifier leurs investissements vers d'autres activités. Pickl (2019) a montré que les entreprises pétrolières avec les réserves les moins importantes (Total, Shell) cherchent à développer les énergies renouvelables pour compenser la future baisse de leurs revenus. Alors que les industriels qui se sont lancés dans l'exploitation du pétrole de roche-mère (Chevron, Exxon Mobil), ont, pour l'instant, fait le choix de se concentrer avant toute chose sur l'exploitation pétrolière.

4) L'essor du non-conventionnel : la mise en déroute de la théorie du pic pétrolier ?

Alors que le pétrole conventionnel a atteint son pic en 2008, la production mondiale de pétrole a depuis continué à croître. De nouveaux produits sont apparus sur le marché, et leur essor est spectaculaire, notamment aux États-Unis.

Les pétroles non-conventionnels, et le LTO (pour *light tight oil*) au premier chef, ont permis à la production pétrolière mondiale de continuer à croître pour dépasser les cent millions de barils quotidiens. Les techniques employées pour extraire le LTO, tant la fracturation (*fracking*) que le forage dirigé (*horizontal drilling*), sont connues depuis les années 1930 et 1940. Leur recours à partir de 2011 est dû, d'une part, au prix élevé du baril (90\$), qui a permis à l'époque à ces techniques très coûteuses d'être enfin perçues comme rentables, mais aussi au déclin des puits de pétrole conventionnel. Le bassin du Permien, à l'Ouest du Texas aux États-Unis, a été la région phare de ce nouvel *eldorado*.

L'exploitation des pétroles de roche-mère (parfois appelés à tort "pétrole de schiste") est plus complexe et plus coûteuse que l'exploitation du pétrole conventionnel. La fracturation de la roche nécessaire pour faciliter la remontée du pétrole et du gaz vers la surface terrestre est un processus qui met en jeu des moyens et des ressources importantes, qui n'a rien de comparable avec l'époque où plonger un tuyau suffisamment large dans un puit naturel de pétrole permettait d'en faire remonter des quantités impressionnantes.

L'extraction des pétroles non-conventionnels connaît un développement depuis la fin des années 2000, bien accompagnée par les politiques énergétiques et monétaires nord-américaines qui ont permis d'aider l'industrie à s'installer durablement. Pour autant, les premières années de l'industrie ont été difficiles (Figure 2). Mais, si la production de non-conventionnel continue

d'augmenter, l'extraction n'y est toujours pas rentable. Il est important de noter qu'en 2018, 75% des entreprises exploitant le non-conventionnel aux États-Unis ne sont toujours pas rentables (Rystad, 2018). Ce sont, pour la plupart, de petits acteurs de l'industrie pétrolière. Les *majors*, qui se contentaient jusqu'alors d'exploiter les réserves conventionnelles bien connues, investissent désormais dans ces bassins, et ce sont ces acteurs historiques qui tirent le plus de bénéfices de ces produits. Les processus industriels d'extraction sont très coûteux, et le prix du baril de pétrole n'est pas assez élevé pour rendre l'activité juteuse pour l'actionnariat. Un ancien président d'une compagnie d'exploitation de gaz de schiste dira même que "presque tous les Étatsuniens ont bénéficié du gaz de schiste, à une exception près : les investisseurs" (Cunningham, 2019). Ceci dit, ces dernières années, l'industrie semble revenir à une situation d'équilibre financier (Figure 2). Un développement des technologies d'extraction et l'acquisition de compétences techniques au sein des acteurs du non-conventionnel ont permis à l'industrie de réduire légèrement les dépenses et les investissements coûteux.

De nouveaux coûts doivent cependant être assumés par l'industrie pétrolière. Outre l'augmentation des coûts d'exploitation (CAPEX) au fil des années et de l'épuisement des réserves les plus faciles à exploiter, certains pays ont légiféré pour que l'industrie prenne en charge le coût environnemental de l'exploitation, comme au Canada où les milliers de puits abandonnés devront être réhabilités et dépollués (Gauthier, 2018). À l'inverse, certains pays (comme le Royaume-Uni) baissent les taxes sur l'extraction pétrolière pour stimuler l'investissement dans ce secteur, en dépit de tous les accords signés pour limiter le réchauffement climatique (Denning, 2019). Les États-Unis ont, à partir de 2005, exempté l'industrie pétrolière du respect des règles environnementales afin de permettre le développement des techniques de *fracking* (Hauter, 2015).

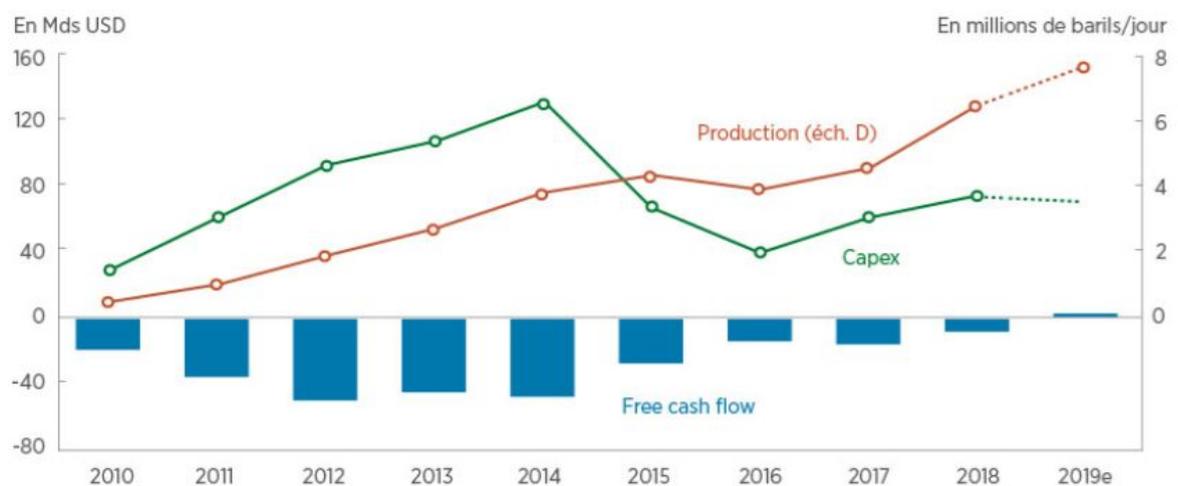


Figure 2 : Production de pétrole de roche-mère, investissements et free cash flow (ou rentabilité) (données : IEA, Bloomberg et Rystad, graphique : Benjamin Louvet)

Le géologue pétrolier Arthur "Art" Berman considère dans notre entretien que l'exploitation du non-conventionnel (et spécifiquement le LTO) est une "fête de départ à la retraite". Il estime que l'essentiel du pétrole exploitable a été foré et extrait, et que l'essor du non-conventionnel constitue le dernier soubresaut de l'industrie pétrolière. Ces aspects laissent penser davantage que l'industrie s'est prise à "gratter les fonds de tiroirs" des sols pétrolifères.

Le recours aux pétroles non-conventionnels n'apparaît pour Matthieu Auzanneau pas comme *"une solution, mais plutôt comme un symptôme du pic pétrolier"* (2018). Pour autant, ce flux supplémentaire de pétrole permet la poursuite de l'approvisionnement industriel et des transports, ainsi que la poursuite de la croissance économique à l'échelle globale. La question que se posent désormais les spécialistes du pétrole est : jusqu'à quand ?

5) Le TRE : le pétrole bientôt gouffre énergétique ?

Parmi les indicateurs étudiés par les énergéticiens, le TRE (ou EROEI en anglais, parfois écrit EROI) pour "taux de retour énergétique" figure en bonne place, notamment pour appréhender la dégradation de l'extraction d'énergie fossile. Il permet de calculer le ratio entre l'énergie investie et l'énergie employée pour extraire et commercialiser de l'énergie. Auparavant de 1 pour 100 aux débuts de l'industrie pétrolière sous la coupe de John D. Rockefeller, il atteint désormais péniblement 1 pour 2 pour l'exploitation de certains pétroles non-conventionnels. Autrement dit : pour produire deux barils de pétrole issu des roches-mères, il faut investir un baril de pétrole d'énergie. Au fil des années, l'énergie investie pour extraire du pétrole est de plus en plus importante, ce qui engendre un coût supplémentaire pour l'industrie d'une part, et ce qui limite de plus en plus l'intérêt énergétique de l'exploitation d'autre part. Aussi, le pétrole de roche-mère nécessite des techniques plus gourmandes en énergie, et émet ainsi plus de CO₂ que le pétrole conventionnel du fait de l'extraction, de 20 à 75% supplémentaire selon Cleveland et O'Connor (2011). Au fur et à mesure du développement de l'extraction du pétrole de roche-mère, l'empreinte carbone de l'exploitation fossile empire.

Au fur et à mesure de la baisse du TRE, la part d'énergie disponible pour nos sociétés se réduit, tant l'apport énergétique nécessaire à l'exploitation augmente. Même si la production continue de croître par un investissement toujours plus important et des technologies d'extraction plus performantes, *"le TRE continuera à décroître"* selon le journaliste spécialiste de ces questions Nafeez Ahmed (interview, 2019).

Le taux de retour énergétique se mesure aussi pour les autres sources d'énergie, dont le charbon. Selon Hall (2014), le TRE du charbon a tendance à baisser lui aussi, du fait de la difficulté croissante de l'exploitation, notamment en Chine.

6) L'importance de la qualité du pétrole :

Ce fameux baril de pétrole, qui est une unité de volume de 159 litres environ, n'est pas une mesure de la quantité d'énergie. En effet, les différents pétroles extraits n'ont pas les mêmes vertus énergétiques, comme d'ailleurs l'essence vendue. Dans nos stations essence, le diesel est plus cher que le sans-plomb car il est plus énergétique et donc plus lourd de 13%. À l'inverse, les pétroles très légers (à la frontière entre gaz et pétrole) sont moins énergétiques. Le *"boom"* du pétrole non-conventionnel

est notamment permis par la production de LTO, qui est du pétrole très léger. La qualité du pétrole - sa densité énergétique - se dégrade progressivement au fur et à mesure de l'exploitation de pétrole plus léger. Mais le pétrole non-conventionnel contient aussi des pétroles très lourds (*XH* pour *extra heavy*) qui sont très denses sur le plan énergétiques, mais qui sont très coûteux à extraire.

Selon une étude menée par Quilcaille *et al.* et publiée en 2018 et sur laquelle nous reviendrons plus tard : *“les premières ressources épuisées sont le charbon, le gaz et le pétrole de bonne qualité, laissant des énergies fossiles avec de plus fortes incertitudes sur leur teneur en carbone et leur valeur calorifique nette. Ainsi l’incertitude sur les émissions des énergies fossiles est à même d’augmenter au fil du temps.”*

La qualité du pétrole extrait est un élément central pour l'apport énergétique de nos sociétés. En effet, les usages multiples du pétrole sont liés à des ressources de différentes qualités, ainsi le pétrole, qu'il soit lourd ou léger, intéressera plus ou moins les raffineurs. Ces derniers devront mélanger certains pétroles pour obtenir le produit commercialisable en tant que diesel par exemple. L'un des éléments importants pour l'industrie et pour les raffineurs tient en la densité du pétrole. Plus il est lourd, plus sa densité énergétique est forte (et son API, la mesure utilisée, sera faible). Mais des mélanges sont effectués par les raffineurs, en fonction de la demande des consommateurs. Ainsi, pour fournir un pétrole de qualité constante, les raffineurs américains, bénéficiant désormais de pétrole léger en quantité à travers le pétrole de roche-mère dont 90% des barils ont un API>40, et sont donc considérés très légers (Daguin, 2018), devront équilibrer en trouvant du pétrole lourd pour proposer un mélange de qualité suffisante à leurs clients. Des projets de raffinerie adaptées au pétrole léger commencent à être envisagés, mais les délais d'autorisation de construction et de mise en service seront de plusieurs années. On ne parle plus d'un seul pétrole, mais de plusieurs pétroles, selon la qualité et l'apport énergétique qu'ils permettent.

7) Les projections actuelles :

La dynamique récente semble montrer le déclin de la majorité des bassins de production comme le montre la Figure 3. Seuls les États-Unis et l'Irak connaissent des évolutions positives depuis le pic de production du pétrole conventionnel de 2005. Les fardeaux économique et énergétique qui pèsent sur l'exploitation du non-conventionnel ne semblent pas durables, et la poursuite de l'essor de ces pétroles semble incertaine.

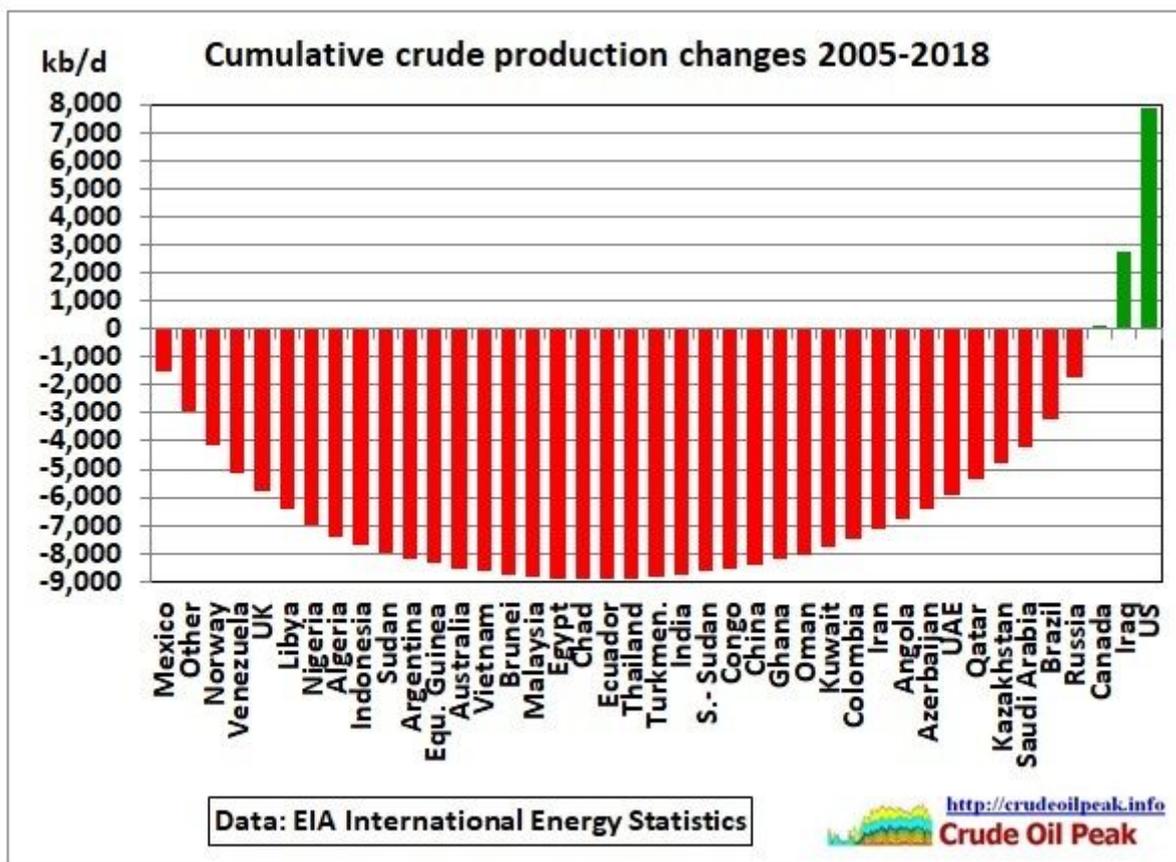


Figure 3 : Evolution de la production de pétrole conventionnel des principaux pays producteurs de 2005 à 2018 (données : AIE, graphique : Mushalik M.)

L'Agence internationale de l'énergie, basée à Paris, dont les données et les rapports sont considérés comme des références pour la question énergétique, et pétrolière en particulier, se montre inquiète par la chute des investissements observée ces dernières années. Dans le dernier rapport annuel publié par l'AIE, et plus précisément dans le résumé pour décideurs, on lit : "Le risque de resserrement de l'offre est très fort pour le pétrole. Le nombre moyen de nouveaux projets d'extraction de pétrole conventionnel approuvé ces trois dernières années ne représente que la moitié de la quantité nécessaire pour équilibrer le marché d'ici 2025. [...] Nos projections incorporent déjà le doublement de la production états-unienne de tight oil, mais il faudrait davantage qu'un triplement pour contrebalancer le faible nombre de projets dans le conventionnel." (WEO p.28, 2018, traduction personnelle). L'AIE se veut rassurante au sujet du gaz, pour lequel de nouveaux projets au Canada et au Qatar devraient permettre de répondre à la hausse de la demande.

La durabilité de l'exploitation de certains puits pétroliers est aussi en question. Lorsque les puits de pétrole conventionnel subissent un déclin de 5 à 7% de leur production à la fin de la première année d'exploitation, les puits de LTO subissent quant à eux un déclin de 40 à 70% en un an (Hugues, 2013). Ainsi, lorsque pour maintenir la production d'un millier de barils par jour, il suffit de 60 nouveaux puits de pétrole conventionnel en Irak, il faut 2 500 nouveaux puits de pétrole non-conventionnel dans le Dakota du Nord. Cette course en avant nécessite de continuer à forer toujours davantage pour

maintenir la production, voire l'accroître comme cela a été le cas aux États-Unis ces dernières années. Mais, comme ce fut le cas pour d'autres ressources naturelles extraites, les puits les plus productifs sont exploités en premier, donc les nouveaux puits exploités sont moins intéressants pour les industriels.

8) Le charbon :

Depuis plus d'une dizaine d'années, le prix du charbon connaît des évolutions similaires à celles du pétrole. En effet, en 2008, le prix du pétrole monta très haut, celui du charbon aussi, les consommateurs - très liés à la production industrielle et au transport -, se détournèrent alors de ces énergies. Les pays producteurs, qui ont pour habitude d'abaisser leur production pour ne pas inonder le marché de leurs produits, font baisser les prix, et certains puits ou certaines mines ne sont plus rentables.

Les usages des deux principales énergies fossiles de la planète sont différents mais la dynamique de déplétion est semblable. Le charbon, dont les réserves sont plus importantes que celles du pétrole, connaîtra toutefois, comme toute ressource naturelle, un pic de sa production. Si celui-ci a moins été analysé par le passé, le pic charbonnier (*peak coal*) devient un sujet d'étude pour de nombreux chercheurs depuis la fin des années 2000 (Wang, 2018). La situation est différente du pétrole pour plusieurs raisons. La première est que la Chine extrait presque la moitié du charbon consommé sur la planète (BP, 2018), mais sa production intérieure décline depuis 2013 faisant grimper ses importations. La deuxième est que le recours au charbon est majoritairement dû à la production électrique, or, comme en Chine, d'autres modes de production se développent, qu'ils soient plus efficaces, ou plus vertueux (le recours au gaz ou les énergies renouvelables, via les subventions publiques). Malgré un léger recul au milieu des années 2010, le charbon reste la deuxième source d'énergie la plus utilisée au monde (BP, 2018).

II) **Des scénarii climatiques très "fossilophages"**

1) De l'alimentation du réchauffement climatique :

Face à l'augmentation progressive du coût d'extraction des énergies fossiles (pétrole en tête), l'industrie tente d'optimiser ses processus, mais surtout, les gouvernements des grands pays consommateurs n'hésitent pas à soutenir financièrement l'exploitation. Ainsi, entre 2015 - année où ont pourtant été signés les accords de Paris visant à réduire les émissions de GES à l'échelle globale -, et 2017, le soutien public aux énergies fossiles a augmenté de 10,6% (FMI, 2019), dont 85% des subsides sous leurs différentes formes vers le pétrole et le charbon. Les pays connaissent leurs intérêts à soutenir l'extraction et la combustion fossiles, tant leur économie est liée à la consommation énergétique du fait de l'élasticité entre ces deux éléments. Or, à l'échelle mondiale, la croissance du PIB est liée à la croissance de l'usage de matériaux et d'énergie (Ward et al., 2016). La consommation énergétique primaire est cointégrée à la croissance économique, la première provoquant la seconde,

selon une élasticité de 0,6 (Giraud et Kahraman, 2014). Bien que l'efficacité énergétique s'améliore, ce qui limite partiellement les besoins énergétiques supplémentaires, les gouvernements sont contraints, malgré leurs engagements en faveur d'une société plus durable, de soutenir les filières d'énergie fossile si elles vacillent car l'énergie issue de l'extraction alimente le développement économique des pays.

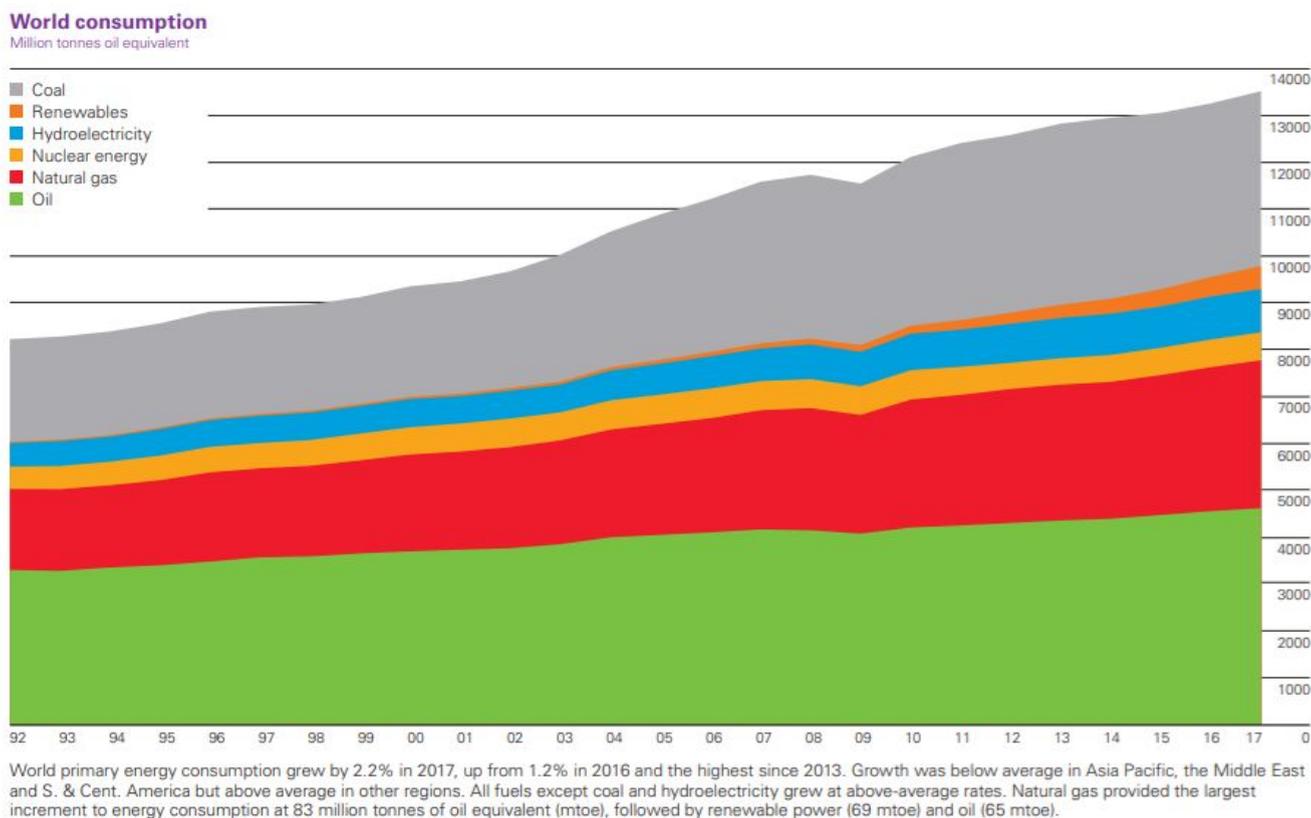


Figure 4 : Consommation mondiale d'énergie (en millions de tonnes équivalent pétrole), selon le BP Statistical Review of World Energy 2018, paru en juin 2019.

Bien que le CO₂ ne soit pas le seul gaz à effet de serre émis par la combustion d'énergies fossiles, il est considéré qu'il est très majoritaire au sein des émissions, et son évaluation est plus précise que pour le CH₄, le SO₂, ou le N₂O (Quilcaille, 2018).

Depuis 1870, plus de 70% des émissions anthropiques de GES ont été générées par la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon) (Le Quéré *et al.*, 2016). D'autres éléments que la combustion d'énergie fossile seront déterminants dans l'évolution du réchauffement climatique. Parmi ceux régulièrement cités : l'usage des sols ou le développement - hypothétique - de techniques de capture et de stockage de carbone, l'évolution de la captation du CO₂ par les puits de carbone naturels, ou encore la quantité incertaine de carbone sous différentes formes libérée par la fonte du pergélisol. Bien que principale porte d'entrée du CO₂ dans l'atmosphère (Quilcaille, 2018), la combustion du pétrole, du gaz et du charbon n'est pas le seul facteur provoquant le réchauffement

climatique. Réussir à diminuer nos émissions par la limitation des émissions liées à ces énergies ne sera pas le seul moyen de lutter contre l'aggravation du réchauffement climatique. La limitation qui s'opérera peut être d'origine physique (les limites géologiques à l'exploitation), politique (les décisions nécessaires prises et appliquées), ou en lien avec ces deux possibilités : forcée et subie.

Un éventuel abandon des énergies carbonées ne signifierait pas pour autant que le réchauffement climatique serait directement enrayeré. La concentration de gaz à effet de serre augmente selon un processus cumulatif, et l'hydrocarbure brûlé demain, même si sa quantité est inférieure à celle consommée hier, renforcera l'effet de serre.

L'effet cumulatif du CO₂ dans l'atmosphère implique que chaque goutte de pétrole brûlée s'ajoute aux précédentes, et, en l'état actuel des connaissances et des processus industriels, nous ne sommes pas capables d'absorber ces quantités de gaz à effet de serre. Ce renforcement progressif du phénomène ne peut pas durer si les énergies fossiles viennent à manquer. Pourtant, les aérosols émis jusqu'alors par les industries carbonées, qui, dans l'optique d'une déplétion fossile, ne seront plus rejetés vers l'atmosphère, et ne pourront plus atténuer l'effet de serre comme c'est le cas actuellement. À l'inverse du CO₂ ou du CH₄, le forçage radiatif des aérosols est négatif (GIEC, 2014). En cas de déclin industriel et de déclin des émissions d'aérosols, l'effet de serre serait accentué pendant une certaine période du fait de la chute des aérosols, avant finalement de redescendre progressivement puisqu'il ne serait plus alimenté par les émissions de GES (Zhao *et al.*, 2019).

2) Des modélisations de plus en plus complètes :

Des *scenarii* d'émissions carbonées existent depuis longtemps, le GIEC s'est penché dessus dès 1992. Dans le rapport *SRES* (pour *Special Report on Emissions Scenarios*) paru en 2000, le GIEC explorait de nombreuses trajectoires de combustion d'énergies fossiles, sur lesquels les *scenarii* d'émissions des rapports plus récents sont basés. Plus précisément, on peut lire que : "*Fossil fuels resources will not limit carbon emissions during the 21st century*" (GIEC p.119-120, 2001). Ces éléments, basés sur une étude de Rogner (1997), incluent les ressources non-conventionnelles dans l'énergie future dont pourront disposer nos sociétés, précisant même que ces ressources, considérées comme futures réserves, ne permettront pas de limiter le réchauffement climatique du fait de leur exploitation. D'une part, les données utilisées pour cette étude se basait sur les proclamations des différents pays, datant de la fin des années 1980, et très contestables comme on l'a vu précédemment. Et d'autre part, cette vision implique une progression technologique continue permettant l'exploitation à moindre coût des pétroles non-conventionnels. Il n'est pas non plus question ici du TRE (ou *EROI*), qui est considéré par certains auteurs comme un indicateur central sur la durabilité de telle ou telle source d'énergie, ni de la volatilité des prix qui provoquera tantôt la baisse de la demande (prix du baril haut), tantôt une récession économique (prix du baril bas) (Murray, 2016).

Depuis les années 2010, la construction de *IAMs* (*integrated assessment modelling*) permet au GIEC d'affiner les *scenarii* du rapport *SRES* (*special report on emissions scenarios*). Ainsi, en 2014, dans le cadre de la publication par le GIEC du rapport *AR5*, les quatre *scenarii RCPs* (*representative*

concentration pathway, ou profils représentatifs d'évolution de concentration), calculés à partir des *IAMs*, introduisent, dans les trajectoires climatiques globales, le forçage radiatif selon les émissions carbonées. Ces *RCPs* incluent, comme les *scenarii SRES*, une disponibilité facile des énergies fossiles, malgré les nombreuses alertes de géologues pétroliers depuis la fin des années 1990 (Wang, 2016). Du fait de ces modèles, les publications du GIEC considèrent la demande pétrolière comme maîtresse de la production pétrolière mondiale, en mettant de côté la différence entre réserves et ressources.

Pour tenter d'envisager les grandes évolutions sociétales de ce siècle, et pour estimer le plus justement possible la hausse de la température globale, la communauté scientifique a proposé depuis la fin des années 2000 cinq *SSPs* (*shared socioeconomic pathways*, ou *scenarii* d'évolution socio-économique) (Hausfather, 2018). Ces futurs sont modélisés à partir de l'évolution de la population, de la technologie, de la croissance économique... et surtout, selon leurs capacités à répondre à l'urgence climatique. Des *IAMs* sont en parallèle développés pour observer les effets de ces évolutions sur la consommation énergétique et sur la concentration de CO2 dans l'atmosphère. Enfin, afin de modéliser le climat futur, les *RCPs* sont des *scenarii* de forçage radiatif, qui évoluent selon différents paramètres dont la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre.

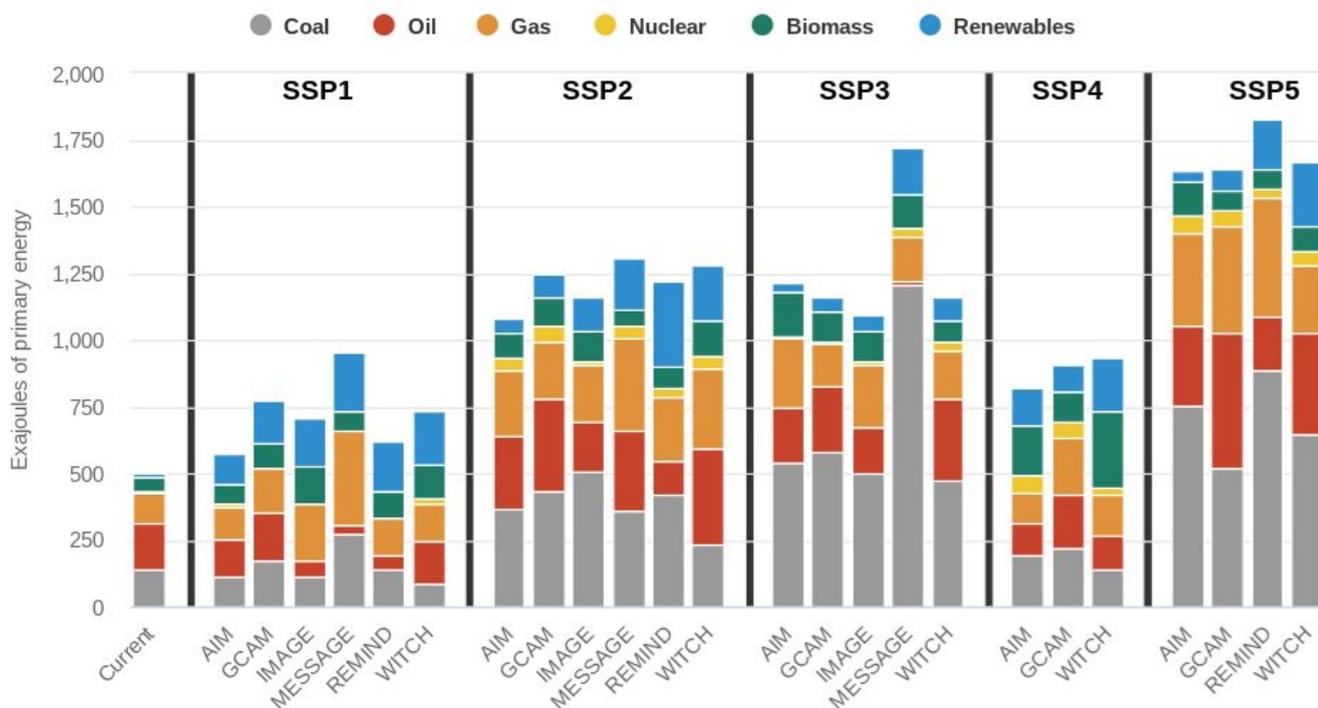


Figure 5 : Énergie primaire consommée en 2100 (valeurs de 2010 à gauche) selon les scenarii IAMs des SSPs (données : Riahi et al., 2017 ; graphique : Carbonbrief, 2018)

Les différents modèles *IAMs* développés par les chercheurs en fonction des cinq *SSPs*, envisagent presque tous un maintien voire une hausse de la consommation d'énergie fossile. Pire, le recours au charbon pourrait être multiplié par 9 dans le cas du *IAM MESSAGE* pour le *SSP3* (de 137 en 2010 à 1203 EJ en 2100).

3) L'approche par budget carbone :

Alors que l'effet de serre est renforcé par nos émissions de GES, une démarche a été développée pour appréhender les quantités de CO₂ que nous pouvions émettre vers l'atmosphère avant un certain réchauffement. L'approche par budget carbone est un outil pour évaluer la concentration atmosphérique de CO₂, permettant d'alimenter les modèles qui envisagent le réchauffement climatique et en esquissent des ordres de grandeur, largement repris par les rapports du GIEC puis par les médias.

Une estimation des budgets carbone à dépenser ou à limiter a été faite par le physicien Jacques Treiner (2015). Nos sociétés ont ainsi émis 1760 GTCO₂ à travers la combustion de 480 GT d'énergie carbonée. Il nous resterait à consommer 2,14 fois ce que nous avons déjà brûlé. Dans cette hypothèse, nous atteindrions une concentration atmosphérique de CO₂ de 614 ppm (contre 410 en 2019). Toutefois, cette concentration, qui provoquerait un réchauffement climatique de l'ordre de 4°C, est très éloignée des 1000 ppm envisagés dans le scénario RCP8.5.

Cependant, deux limites ont été identifiées à cette approche par budget carbone. Premièrement, comme le dit Peters (2018), il n'y a pas de "*nombre magique*" permettant d'évaluer précisément la quantité de carbone que nos sociétés peuvent émettre dans l'atmosphère avant d'atteindre une hausse de la température globale, il ne s'agit que d'estimations, avec des fourchettes parfois assez larges. Deuxièmement, cette approche est limitée par l'incertitude du futur des exploitations pétrolière, gazière et carbonifère. Pour gagner en précision, il faudrait une meilleure connaissance des réserves géologiques de ces différentes énergies, mais aussi une meilleure appréciation de la capacité de l'industrie à exploiter malgré les difficultés croissantes. Enfin, pour estimer de façon précise la hausse de la température globale, une boule de cristal indiquant les choix énergétiques que nos sociétés vont prendre dans les années à venir permettrait de connaître précisément nos émissions futures. Malheureusement, nous ne disposons pas encore de cet outil.

4) Croiser les données pour avancer ?

Parmi les projections climatiques du GIEC, le scénario le plus "fossilophage" (appelé RCP8.5) implique un pic de la combustion d'énergie fossile à 350 EJ/an vers 2075 (GIEC, 2014), contre une valeur observée de 180 EJ/an en 2016 (moyenne des valeurs de l'AIE et de l'US EIA, 2016). Bien que la dynamique actuelle d'émissions carbonées suive cette tendance climaticide, les éléments issus des études géologiques ne semblent pas accréditer l'hypothèse d'un doublement de l'exploitation des énergies fossiles d'ici 2075.

Un groupe de chercheurs, sous la direction de Jianliang Wang (2016), a réalisé une modélisation climatique selon les réserves d'énergie fossile admises par les organes officiels et les articles des revues à comité de lecture. En comparant aux *scenarii* du GIEC, à la fois issus du rapport *SRES* et du rapport *AR5*, cette équipe a employé le modèle *MAGICC*, pouvant y inclure leurs propres données concernant

les réserves exploitables de pétrole, de gaz, et de charbon. Deux *scenarii* ont été proposés par cette équipe, l'un se contentant du pétrole conventionnel (SD-PC), l'autre (nommé SD-PCU) incluant à la fois le conventionnel et le non-conventionnel. La trajectoire du scénario SD-PCU engendre la hausse de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère jusqu'à 610 ppm d'ici 2100, provoquant un réchauffement global de l'ordre de 2,63°C. La Figure 6 permet de comparer les résultats obtenus par les modèles du GIEC, et par les modèles de l'équipe de Wang. Le scénario du GIEC issu du rapport AR5 le plus proche du scénario SD-PCU est le *RCP4.5*. L'écart est très important entre d'une part les *RCP8.5* et *RCP6*, et les SD-PC et SD-PCU d'autre part. Cette différence est imputable, selon les auteurs de l'étude, aux modèles du GIEC, pour lesquels toutes les ressources fossiles sont considérées comme récupérables par nos sociétés.

J. Wang et al. / Futures 86 (2017) 58–72

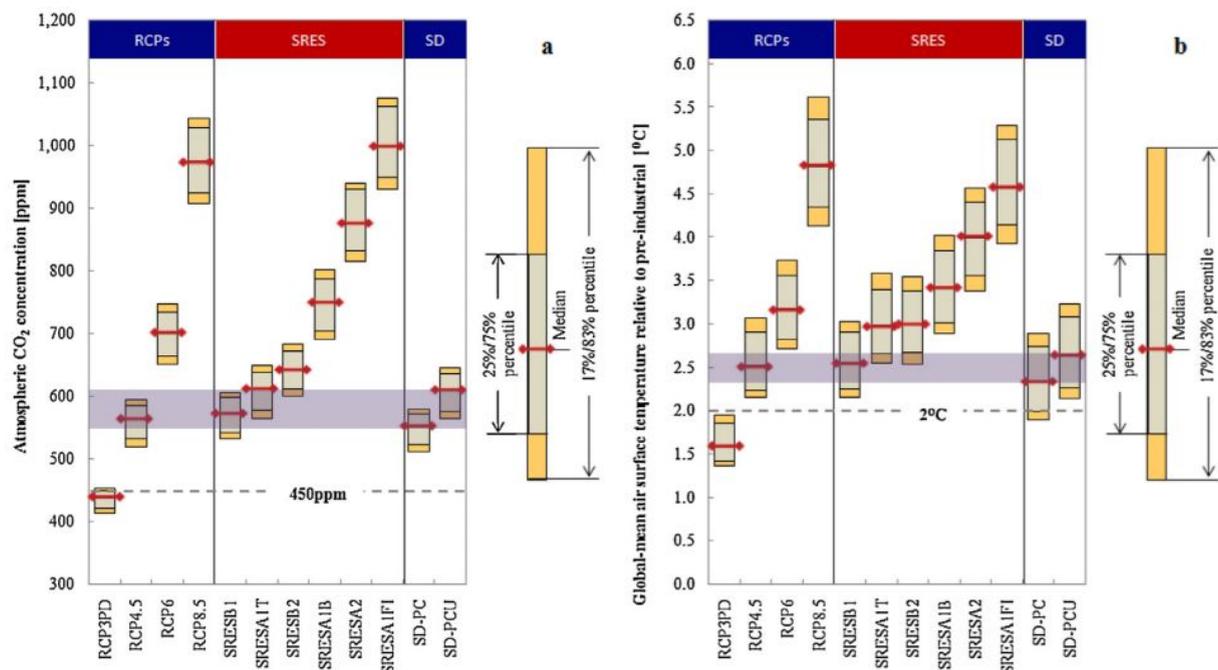


Figure 6 : Comparaison de la [CO₂] atmosphérique (a) et du réchauffement global (b) selon les scénarii du rapport SRES, du rapport AR5, et de l'étude de Wang et al.

Une étude parue en 2015 et menée par Mohr *et al.* permet de prendre du recul sur les *scenarii* du GIEC. Si la dynamique actuelle d'émission de CO₂ se superpose à la trajectoire la plus climaticide, appelée RCP8.5, les réserves ultimes exploitables d'énergies fossiles (ou *URR* pour *ultimately recoverable resources*) connues ne permettent pas d'envisager la poursuite d'un tel scénario. Selon l'équipe internationale qui a publié ces travaux, le scénario du GIEC le plus proche de leurs résultats est le RCP4.5 (similaire au scénario développé par Mohr *et al.* : *BG* pour *best guess*). Dans ce scénario, les chercheurs envisagent un pic fossile pour 2025. Dans leur scénario *low*, ils envisagent un pic fossile entre 2020 et 2025, et, c'est d'ailleurs ce qu'envisage l'Agence internationale de l'énergie. En conclusion de l'article, Mohr *et al.* doutent, fort heureusement, de la soutenabilité du scénario RCP8.5 du GIEC du fait du manque d'énergies fossiles pour alimenter cette trajectoire. Ils considèrent que le RCP6.0 constitue la limite haute de ce que nos sociétés seront capables d'émettre d'ici la fin du siècle,

et que, plus probablement, le scénario *RCP4.5* constitue la trajectoire la plus probable du fait du déclin des énergies fossiles après 2025.

L'équipe de Capellan-Perez, en 2016, a permis de comparer les réserves d'énergie fossile estimées par le GIEC, et celles estimées par l'équipe de Mohr appelées *RURRs* (Figure 4). On y voit que le charbon a des réserves très importantes dans les scénarii du GIEC, par rapport aux données des géologues.

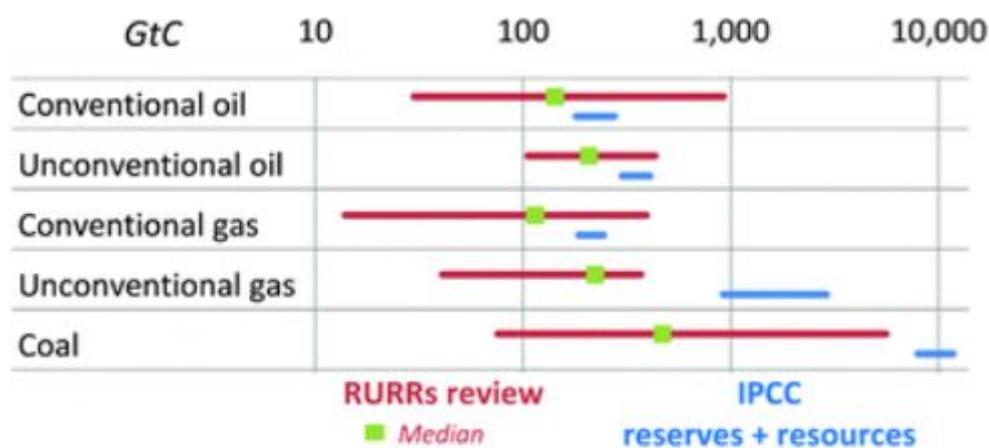


Figure 7 : Estimations des réserves et des ressources fossiles selon les données de Mohr (2015) et celles du rapport AR5 du GIEC (2014) (graphique : Capellan-Perez et al., 2016) (attention : échelle logarithmique).

Dans sa thèse soutenue en 2018, Yann Quilcaille a modélisé l'évolution du climat en fonction des réserves d'énergies fossiles données par Mohr *et al.* Si l'on considère comme plus probable l'hypothèse d'un scénario *BG (medium)* ou *low*, alors on se dirige vers un réchauffement climatique de l'ordre de 2 à 2,5°C d'ici 2100. Là aussi, les scénarii du GIEC correspondant sont les *RCP4.5* et *6.0*. Toutefois, le climatologue considère que les processus naturels de la Terre expliquent majoritairement les variations à venir.

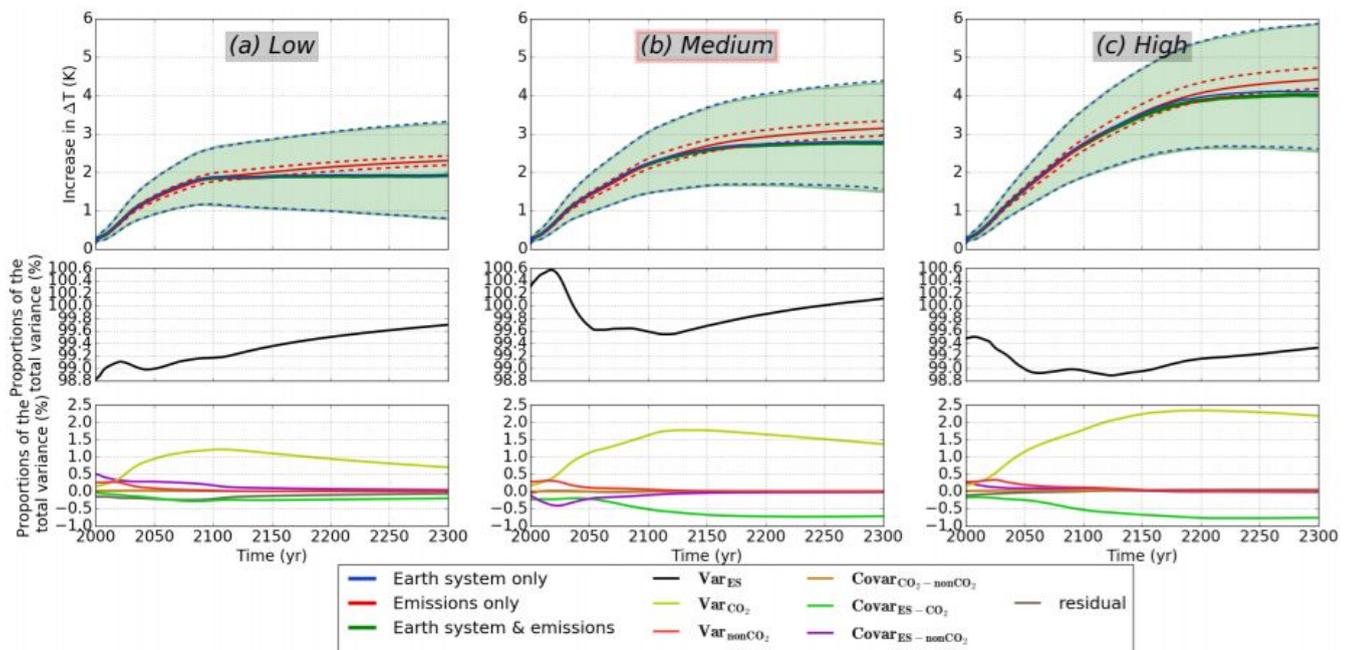


Figure 8 : évolution de la température de surface de la Terre selon les trois scénarii de Mohr et al. et variance de différents paramètres (source : Quilcaille, 2018).

Dans une étude parue en 2017, Ritchie et Dowlatabadi explorent cette fois les scénarii énergétiques utilisés par le GIEC. Les chercheurs expliquent que les SSPs les plus climaticides sont dirigés par un essor de la combustion du charbon au cours du siècle, ce qui va à l'encontre des projections issues des études géologiques. Un développement régulier de l'exploitation du charbon impliquerait une hausse de nos émissions de CO₂, mais le charbon apparaît aujourd'hui comme une ressource naturelle dont le pic a déjà été atteint, et dont un déclin de l'extraction semble se profiler. Les chercheurs vont jusqu'à dire que le scénario "SSP5-RCP8.5 est hautement improbable car il est basé sur un recours accru au charbon qui fausse les scénarii énergétiques produits par les IAMs" (p.2, traduction personnelle). Les données géologiques actuelles, comme celles de Mohr (2016), ne permettent pas d'envisager une telle durabilité de l'extraction fossile. Ainsi, "l'hypothèse charbon" des IAMs, selon laquelle nos sociétés vont exploiter l'ensemble du charbon présent sous nos pieds, n'apparaît pas très réaliste en l'état actuel des connaissances (Ritchie et Dowlatabadi, 2017).

Un réchauffement de 2,5°C en 2100 aura des impacts très lourds sur les sociétés humaines. De ce fait, la mitigation des émissions de GES ne peut pas se contenter du déclin futur de la combustion d'énergies fossiles.

III) De l'intérêt du traitement journalistique de ce sujet

1) Apprendre des projections parcellaires :

Cette approche amène à réestimer le réchauffement climatique en-deçà des prévisions les plus climaticides du GIEC et peut être assimilée, si elle n'est pas correctement documentée, justifiée et

relativisée, à du climato-scepticisme. Bien évidemment, ce n'est pas l'objet de ce sujet d'étude. La concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère continue de grimper, mesurée pour la première fois en mai 2019 à plus de 415 ppm (valeur inédite sur Terre depuis plus de trois millions d'années). Tandis que la hausse de la température globale a été mesurée à +1°C (Lorck, 2019).

Cette hypothèse ne peut pas non plus constituer un argument de négation ou de relativisation du réchauffement climatique. Le croisement des *scenarii* climatiques et d'exploitation fossile est complexe. Cette prudence nécessaire ne permet pas l'emploi de phrases-choc, et les liens de causalité sont à la fois longs à expliquer, et les conclusions à en tirer sont incertaines. Le traitement journalistique est donc à envisager tout particulièrement comme un travail pédagogique minutieux, précautionneux. Admettre l'incertitude est un pas vers l'information telle qu'elle est disponible dans la littérature scientifique.

2) Mieux connaître un phénomène pour mieux le traiter :

Ce sujet mérite d'être l'objet d'un traitement de journalisme scientifique. Mieux évaluer le réchauffement climatique - même s'il subsistera des incertitudes jusqu'aux mesures - à travers une meilleure connaissance de son ampleur pourra permettre, d'une part, de faciliter la communication climatique (que ce soit pour les scientifiques, les journalistes, comme les militants), et, d'autre part, d'envisager plus précisément les changements (ou les bouleversements) des politiques publiques. Aussi, mieux envisager la production pétrolière et donc l'apport énergétique possible à notre société est essentiel pour envisager les changements sociétaux. Des débats ont lieu sur la hausse précise de la température globale d'ici à 2100, y compris au sein de la communauté scientifique. Lorsque certains envisagent un emballement climatique lié aux boucles de rétroaction positives comme la fonte du pergélisol, entraînant rapidement la fin de l'humanité (Nuccitelli, 2018), d'autres considèrent plutôt que des choix politiques et technologiques judicieux permettront de limiter le réchauffement climatique au niveau des ambitions signées à Paris en 2015 (Le Hir, 2018).

Interviewé dans le cadre de mon mémoire, Yann Quilcaille considère pour sa part que : *“le problème n'est pas « on n'est pas certain de pouvoir émettre assez pour en arriver à ce niveau de changement climatique » mais plutôt « on n'est pas certain de pouvoir émettre suffisamment peu pour ne pas dépasser cet autre niveau, car au-delà, les pertes vont devenir de plus en plus importantes »*”. Il est tout à fait possible de reconnaître une incertitude dans les délais, les probabilités, et les facteurs pouvant amener à faire évoluer les connaissances et les prévisions. Les climatologues auteurs des rapports du GIEC prennent déjà des précautions en émettant des *scenarii* et des probabilités d'occurrence d'événements et de phénomènes.

3) Un traitement médiatique irrégulier :

Ces deux sujets connaissent un intérêt différencié selon l'endroit et selon l'époque. Tout d'abord, le réchauffement climatique suscite un intérêt régulier en France, avec des variations liées au “calendrier climatique”, marqué d'une part par les *COPs* (*conference of parties*) organisées et

médiatisées en fin d'année, et, d'autre part, par les vagues de chaleur en métropole. Dans le reste du monde, le *global warming* subit des variations intra-annuelles, bien plus faibles qu'en France, mais, surtout, les recherches sur ce sujet sont en déclin ces dernières années par rapport aux années 2000.

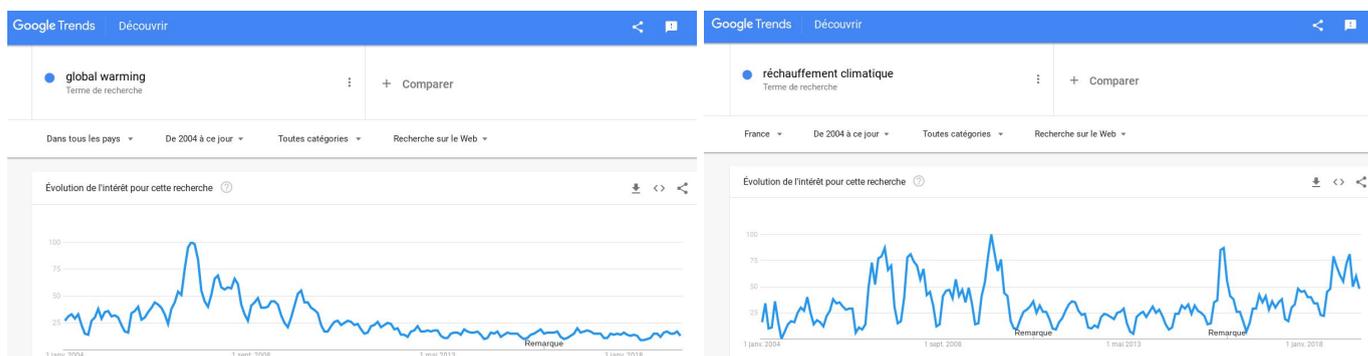


Figure 9 : évolution depuis 2004 (jusqu'au 18/06/2019) des recherches sur Google des termes : “global warming” (échelle mondiale) (a) et “réchauffement climatique” (France) (b)

Ainsi, en France, le pic pétrolier a été l'objet de nombreuses recherches dans la deuxième partie des années 2000, après la sortie du livre de l'ancien ministre Yves Cochet, “Pétrole Apocalypse” (2005), avant de décliner progressivement mais de susciter régulièrement un intérêt. Les prévisions ratées de l'ancien ministre, qui ont été mises en déroute par l'essor du non-conventionnel, ont peut-être nui à la médiatisation de ce débat en France depuis. Le mathématicien envisageait alors la fin des vols *low cost* avant 2010, et un déclin de la production pétrolière pour 2006. À l'échelle mondiale, les recherches au sujet du *peak oil* n'ont eu de cesse de décliner, jusqu'à devenir négligeables depuis 2010, peut-être en lien avec l'essor de l'exploitation du non-conventionnel.

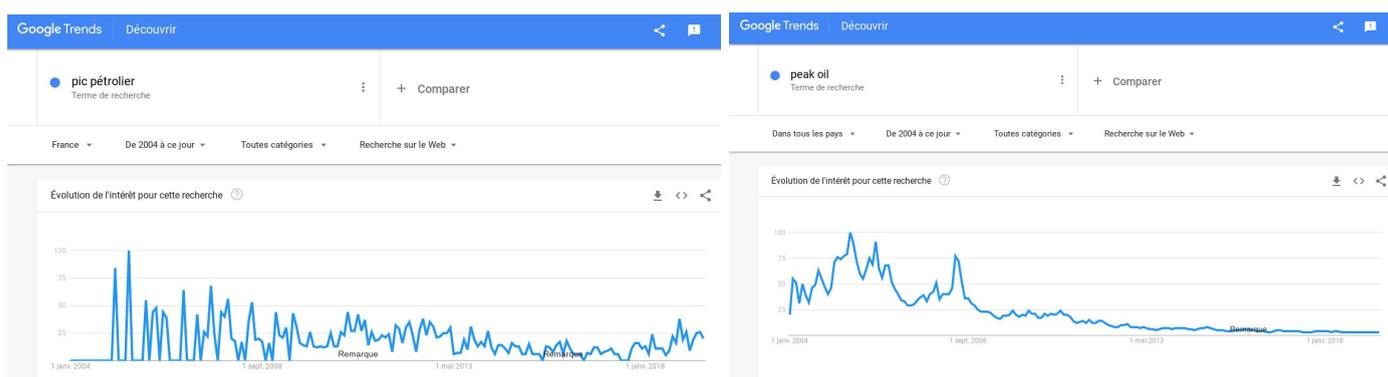


Figure 10 : évolution depuis 2004 (jusqu'au 18/06/2019) des recherches sur Google des termes : “pic pétrolier” (France) (a) et “peak oil” (échelle mondiale) (b)

Travailler sur ce sujet ne doit pas se résumer à suivre aveuglément les prédictions des “picistes”, ni à négliger leurs travaux d'un revers de main. Une dichotomie trop simpliste, entre ceux qui prédisent la fin du pétrole pour demain et ceux qui considèrent que l'exploitation fossile ne connaîtra pas de limite au cours du siècle, contraint le débat et ne permet pas une appréciation plus fine des enjeux sociétaux qui nous font face. Si les coûts d'extraction du pétrole non-conventionnel

sont réduits par certaines avancées technologiques et une certaine relâche fiscale, l'exploitation n'en demeure pas moins limitée par les stocks géologiques des puits de pétrole. Le débat peut aussi être faussé par les prévisions qui se sont révélées fausses, et par les écrits ou les propos climato-sceptiques de certains picistes. Renvoyer picistes et climato-conscients dos à dos ne permet pas un traitement juste et une approche scientifique du sujet.

4) Les réactions :

Malgré de nombreuses études sur le pic pétrolier et la déplétion énergétique, certaines estimations passées décrédibilisent la recherche pétrolière. Ainsi, lors de mes démarches auprès de rédactions pour publier un article à ce sujet, l'expression "pic pétrolier" est apparue pour mes interlocuteurs comme un repoussoir. Alors que le GIEC est reconnu comme un organe scientifique de référence, les éléments scientifiques qui permettent d'envisager un déclin à moyen terme de la production pétrolière ne semblent pas pris au sérieux et ne méritent pas un traitement médiatique à part entière.

Parmi les réactions suscitées par ce sujet, la plus courante a été le rejet de cette idée, alors que d'autres rédactions ont souhaité connaître les sources scientifiques des éléments appuyés. Toutefois, il aura été très difficile de trouver une rédaction, d'une part du fait de mon manque d'expérience en journalisme, mais aussi du fait des précautions prises sur ce sujet. Ainsi, une journaliste d'une rédaction que j'ai sollicitée, m'a rétorqué d'un ton stupéfait, lors d'un entretien téléphonique : "*vous mettez en doute le GIEC ?*". Malgré la tentative d'explication de la réflexion menée dans ce mémoire, et la citation de sources scientifiques, je n'ai pas réussi à la convaincre du caractère pédagogique et analytique de ce sujet.

Conclusion :

L'incertitude et la précaution sont importantes pour traiter de ce sujet. Les projections ne sont pas des prédictions, et les limites admises par les études scientifiques sont à prendre en considération. Quelques éléments de réponses peuvent cependant être avancés à la question posée dans le titre du mémoire. Le réchauffement climatique, dont les dégâts sont déjà observés et l'ampleur déjà mesurée, continuera de s'accroître, même si nos sociétés arrêtaient dès demain leurs émissions de GES. Toutefois, l'augmentation de l'exploitation des énergies fossiles envisagée par les *scenarii* du GIEC ne semble pas réaliste. Au contraire, l'hypothèse la plus probable pour l'avenir des énergies fossiles est un déclin lié à un épuisement progressif des réserves géologiques. Ainsi, les *scenarii* les plus climaticides (*RCP8.5* et *6.0*) ne pourront probablement pas être suivis tant le resserrement de l'offre en pétrole, en gaz et en charbon, semble se profiler dans les décennies à venir. Considérer que l'augmentation du prix du pétrole permettra de continuer l'exploitation se révèle une approche trop limitée, tant l'approvisionnement énergétique à bas coût a permis de soutenir le développement de nombreux pays.

Il est possible que les décisions politiques ne suffisent pas à limiter le réchauffement climatique, mais les contraintes physiques d'exploitation des énergies fossiles feront, selon plusieurs sources scientifiques, baisser à terme nos émissions de GES. Le réservoir de carburant qui cause l'accentuation de l'effet de serre se vide, sans que nous soyons capables de le remplir. Certes, si cette hypothèse se vérifie, cela constituerait une bonne nouvelle pour nos sociétés sur le plan climatique, mais le revers de la médaille est aussi à envisager : notre société basée sur la combustion d'énergies fossiles verra son fonctionnement bouleversé.

Le journaliste scientifique apparaît dès lors dans une situation complexe où le réchauffement climatique bien connu et déjà mesuré n'est - sans doute - pas en mesure d'atteindre l'ampleur qui serait la sienne si les émissions de GES d'origine anthropique continuaient à croître selon la dynamique actuelle.

En plus du réchauffement climatique, d'autres enjeux environnementaux apparaissent désormais critiques pour le XXIème siècle. Si l'épuisement des énergies fossiles marquera un tournant décisif dans notre modèle de développement, la déplétion des énergies fossiles marquera aussi un stress fort pour les populations occidentales habituées à l'abondance énergétique (Lambert et Lambert, 2011).

Bibliographie :

Article de revues à comité de lecture :

Bardi U., "Peak oil, 20 years later : Failed prediction or useful insight ?", in *Energy Research & Social Science*, 2019 ([lien](#)).

Bardi U., "The mineral economy : a model for the shape of oil production curves", in *Energy Policy*, 2005 ([lien](#)).

Bardi U. et Lavacchi A., "A simple interpretation of Hubbert's model of resource exploitation", in *Energies*, 2009 ([lien](#)).

Bauer (et al.), "Shared socio-economic pathways for the energy sectors - quantifying the narratives", in *Global Environment Change*, 2017 ([lien](#)).

Brandt A.R., "Testing Hubbert", in *Energy Policy*, 2007 ([lien](#)).

Campbell C. J. et Laherrère J., "The end of cheap oil", in *Scientific American*, 1998 ([lien](#)).

Capellán-Pérez I. (et al.), "Likelihood of climate change pathways under uncertainty on fossil fuel resource availability", in *Energy & Environmental Science*, 2016 ([lien](#)).

Cleveland C.J., O'Connor P.A., "Energy return on investment (EROI) of shale oil", in *Sustainability*, 2011 ([lien](#)).

Friedrichs J., "Peak energy and climate change : the double bind of post-normal science", in *Futures*, 2011 ([lien](#)).

Giraud G. et Kahraman Z., "How dependent is growth from primary energy ? The dependency ratio of energy in 33 countries (1970-2011)", in Documents de travail du centre d'économie de la Sorbonne, 2014 ([lien](#)).

Hall C.A.S. (et al.), "EROI of different fuels and the implications for society", in *Energy Policy*, 2014 ([lien](#)).

Hallock Jr. J.L. (et al.), "Forecasting the limits to the availability and diversity of global conventional oil supply : validation", in *Energy*, 2013 ([lien](#)).

Han S. (et al.), "Peak coal in China : a literature review", in *Resources, Conservation and Recycling*, 2018 ([lien](#)).

Hubbert M.K., "Energy from fossil fuels", in *Science*, 1949 ([lien](#)).

Lambert J.G. et Lambert G.P., "Predicting the psychological response to the American people to oil depletion and declining energy return on investment (EROI)", in *Sustainability*, 2011 ([lien](#)).

Le Quéré (et al.), "Global carbon budget 2016", in *Earth System Science Data*, 2016 ([lien](#)).

Maugeri L., "Oil : never cry wolf. Why the petroleum age is far from over", in *Science*, 2004 ([lien](#)).

Miller R.G., Sorrell S.R., “*The future of oil supply*”, in *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 2014 ([lien](#)).

Mohr S.H. (et al.), “*Projection of world fossil fuels by country*”, in *Fuel*, 2015 ([lien](#)).

Murphy D.J. et Hall C.A.S., “*Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth*”, in *Ecological Economics Reviews*, 2011 ([lien](#)).

Murray J., “*Limitations of oil production to the IPCC scenarios : the new realities of US and global oil production*”, in *Biophysical economics and resource quality*, 2016 ([lien](#)).

Nashawi I.S. (et al.), “*Forecasting world crude oil production using multicyclic Hubbert model*”, in *Energy Fuels*, 2010 ([lien](#)).

Peters G.P., “*Beyond carbon budgets*”, in *Nature Geoscience*, 2018 ([lien](#)).

Peters G.P. (et al.), “*Towards real-time verification of CO2 emissions*”, in *Nature Climate Change*, 2017 ([lien](#)).

Pickl M.J., “*The renewable energy strategies of oil majors - From oil to energy ?*”, in *Energy Strategy Reviews*, 2019 ([lien](#)).

Quilcaille Y., “*From uncertainties on emissions from fossil fuel combustion to climate change*”, 2016, consulté le 29/05/2019 ([lien](#)).

Quilcaille Y., “*Retour sur les scénarios climatiques et d’émissions à l’aide d’un modèle compact du système Terre*”, thèse de doctorat soutenue en 2018 ([lien](#)).

Quilcaille Y. (et al.), “*Uncertainty in projected climate change arising from uncertain fossil-fuel emissions factors*”, in *Environmental Research Letters*, 2018 ([lien](#)).

Ravetz J., “*The post-normal science of precaution*”, in *Futures*, 2004 ([lien](#)).

Riahi (et al.), “*The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : an overview*”, in *Global Environment Change*, 2017 ([lien](#)).

Ritchie J. et Dowlatabadi H., “*Why do climate change scenarios return to coal ?*”, in *Energy*, 2017 ([lien](#)).

Rogner H-H., “*An assessment of world hydrocarbon resources*”, in *Annual review of Energy and the Environment*, 1997 ([lien](#)).

Treiner J., “*Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone*”, in *Reflets de la physique*, 2015 ([lien](#)).

Wang (et al.), “*The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections : a supply-side analysis*”, in *Futures*, 2017 ([lien](#)).

Wang Q. et Li R., “Decline in China’s coal consumption : an evidence of peak coal or a temporary blip ?”, in *Energy Policy*, 2017 ([lien](#)).

Ward J. (et al.), “High estimates fo supply constrained emissions scenarios for long-term climate risk assessment”, in *Energy Policy*, 2012 ([lien](#)).

Ward J. (et al.), “Is decoupling GDP growth from environmental impact possible ?”, in *PLoS ONE*, 2016 ([lien](#)).

Zhao A. (et al.), “Strong influence of aerosol reductions on future heatwaves”, in *Geophysical Research Letters*, 2019 ([lien](#)).

Articles de presse ou de blog :

Auzanneau M. et Cordiez M., “Extraction minière : “sortir des énergies fossiles est une nécessité vitale pour la France, qui n’a toujours pas de pétrole et manque d’idées””, in *Le Monde*, 2019 ([lien](#)).

Auzanneau M. et Durand B., “Pétrole : la France et l’Europe doivent prendre au sérieux l’alerte rouge de l’Agence internationale de l’énergie”, in *La Revue Parlementaire*, 2019 ([lien](#)).

Auzanneau M. et Serina G., “Pétrole - La panne sèche ?”, in *Le Monde*, 2005 ([lien](#)).

Andrews S., “The world of oil according to Hubbert, in 1988”, in *The Oil Age*, 1988 ([lien](#)).

Berman A., “Tight oil money return on investment. Eagle Ford shale case history”, in *artberman.com*, 2018 ([lien](#)).

Bouso R., “UK North Sea oil output to resume decline after brief respite”, in *Reuters*, 2019 ([lien](#)).

Cunningham N., “Shale pioneer : fracking is an “unmitigated disaster””, in *Oilprice.com*, 2019 ([lien](#)).

Denning L., “Oil’s next great deflationary force : taxes”, in *Bloomberg*, 2019 ([lien](#)).

Dichristopher T., “Shale drillers cut billions of dollars in spending, raising questions about US oil output”, in *CNBC*, 2019 ([lien](#)).

Eliakim P., “On est encore loin de manquer de pétrole”, in *Capital.fr*, 3/10/2017 ([lien](#)).

Gauthier P., “Comment le pétrole et le gaz naturels se forment-ils ?”, in *energieetenvironnement.com*, 2019 ([lien](#)).

Gauthier P., “Il faudra 2830 pour restaurer les sites pétroliers de l’Alberta”, 2019, consulté le 5/06/2019 ([lien](#)).

Hausfather Z. (traduction par Hensgen O. et Jullien B.), “Analyse : quel “budget carbone” pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C ?”, in *Carbonbrief.org*, 3/10/2018 ([lien](#)).

Hausfather Z., “Explainer : how “shared socioeconomic pathways” explore future climate change”, in *Carbonbrief*, 2018 ([lien](#)).

Hauter W., *“10 years later : fracking and the Halliburton Loophole”*, in *Ecowatch*, 2015 ([lien](#)).

KallanishEnergy (rédaction), *“Just 10% of U.S. shale oil players are cash flow positive”*, 2019 ([lien](#)).

Le Hir P., *“Réchauffement climatique : la bataille des 2°C est presque perdue”*, in *Le Monde*, 2017 ([lien](#)).

Le Monde (rédaction), *“Greenpeace contrainte une plate-forme pétrolière de BP à faire demi-tour”*, in *Le Monde*, 2019 ([lien](#)).

Lorck J., *“La barre des 415 ppm de CO2 franchie pour la première fois en mai 2019”*, in *Global-climat*, 2019 ([lien](#)).

Lorck J., *“Nuages : les aérosols pourraient avoir un impact plus important que prévu”*, in *Global-climat*, 2019 ([lien](#)).

Mushalik M., *“What happened to crude oil production after the first peak in 2005 ?”*, consulté le 28/05/2019 sur [Crudeoilpeak.info](#) ([lien](#)).

Mushalik M., *“World crude production outside US and Iraq is flat since 2005”*, consulté le 11/06/2019 sur [Crudeoilpeak.info](#) ([lien](#)).

Nuccitelli D., *“There are genuine climate alarmists, but they’re not in the same league as deniers”*, in *The Guardian*, 2018 ([lien](#)).

Rueb E.S., *“‘Freedom gas’, the next American export”*, in *The New York Times*, 2019 ([lien](#)).

Soldatkin V., *“Gazprom Neft says Bazhenov shale oil output to reach viability by 2022-2023”*, in *Reuters*, 2019 ([lien](#)).

Strahan D., *“Slippery slope”*, in *The Guardian*, 2007 ([lien](#)).

The Moscow Times (rédaction), *“Russia is only 3 years away from peak oil, energy minister warns”*, 19/09/2018 ([lien](#)).

Tverberg G., *“Have we already passed world peak oil and world peak coal ?”*, in *Our Finite World*, 2019 ([lien](#)).

Ward A., *“North Sea oil producers chart a course for revival”*, in *Financial Times*, 2016 ([lien](#)).

Rapports d’instances internationales, d’entreprises ou de think tank :

Agence internationale de l’énergie, *“World energy outlook 2018”*, 2018 ([lien](#)).

BP (*British Petroleum*), *“BP Statistical Review of World Energy”*, 2019. ([lien](#)).

Daguin O. et Louvet B., *“Note commodités - Mars 2018, Energie : bientôt, LE pétrole n’existera plus”*, in OFI Asset Management, 2018 ([lien](#)).

FMI (fonds monétaire international), *“Global fossil fuel subsidies remain large : an update based on country-level estimates”*, 2019 ([lien](#)).

GIEC, *“Climate change 2014, synthesis report (AR5)”*, 2014 ([lien](#)).

GIEC, *“IPCC Special Report on Emissions Scenarios”*, 2000 ([lien](#)).

Hugues Davis J., *“Drill, baby, drill : can unconventional fuels usher in a new era of energy abundance ?”*, in *Post-carbon institute*, 2013 ([lien](#)).

Laherrère J., *“Extrapolation of oil past production to forecast future production in barrels”*, in ASPO France, 2018 ([lien](#)).

Laherrère J., *“World NGL production”*, in ASPO France, 2017 ([lien](#)).

Louvet B., *“Pétrole de schiste : y a-t-il un marché pérenne ?”*, in OFI Asset Management, 2019 ([lien](#)).

ONU, *“Emissions gap report 2018”*, 2018 ([lien](#)).

Rystad Energy (communiqué de presse), *“More than 75% of dedicated US shale oil companies keep reporting CAPEX in excess of CFO”*, in Rystad Energy, 2018 ([lien](#)).

Thévard B., *“La diminution de l'énergie nette, frontière ultime de l'Anthropocène”*, pour l'Institut Momentum, 2013 ([lien](#)).

Livres/Podcast/Divers :

Auzanneau M., *“Or noir - La grande histoire du pétrole”*, Editions La Découverte, 2016.

Auzanneau M. et Bauquis P.-R., *“Vers un monde sans pétrole ?”*, in *“Economie de la rareté (¾)”* pour France Culture, 5/06/2019 ([lien](#)).

Chedid L., *“Bidon de Gas-Oil”*, dans l'album *“Répondez-moi”*, 1997 ([lien](#)).

Goblot P. (réalisateur), *“C'est la fin du pétrole”*, in *“Data Science vs Fake”* pour Arte, 2018 ([lien](#)).

Annexes :

1) Article 1 : 6000 caractères :

Le réchauffement climatique, bientôt en panne d'essence ?

Depuis plus de deux siècles, les sociétés industrialisées n'ont eu de cesse d'augmenter leur consommation d'énergies fossiles pour assurer leur croissance. Malheureusement, les atouts énergétiques incomparables du charbon, du pétrole et du gaz, ne dissimulent plus leurs revers. Parmi ceux-ci, le plus visible et celui qui altère le plus notre environnement est le réchauffement climatique, déjà mesuré à +1°C par rapport à la seconde moitié du XIX^e siècle. Les climatologues considèrent que plus de 70% du phénomène est imputable à la combustion des énergies carbonées¹.

La trajectoire la plus climaticide

Malgré de nombreux accords signés engageant les États à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), la consommation combinée de charbon, de pétrole et de gaz n'a jamais été aussi importante. De ce fait, la trajectoire d'émissions suivie par nos sociétés se confond ainsi avec le scénario le plus climaticide (appelé *RCP8.5*) envisagé par le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Pour la conception des *scenarii* climatiques, les modélisateurs s'appuient sur les données des énergies fossiles publiées dans une étude géologique datant de 1997². Ce travail ne mesure pas seulement l'énergie fossile encore extractible (les réserves), mais l'ensemble des ressources se trouvant sous terre, y compris ce qui semble inaccessible.

Ainsi, les trajectoires climatiques émises depuis se fondent sur l'hypothèse que nos sociétés seront capables d'extraire l'ensemble des énergies carbonées présentes dans le sol. Le scénario *RCP8.5* est alimenté par une consommation globale de 2100 gigatonnes (Gt) d'énergies fossiles d'ici 2100, entraînant une hausse de la température globale de l'ordre de 4 à 5°C³. Dans ce bouleversement progressif de notre milieu, nos sociétés seront secouées par des événements extrêmes, certains territoires deviendront impropres à la vie humaine, et nos systèmes agricoles subiront des pressions inédites.

Une limitation involontaire de nos émissions ?

Ceci dit, plusieurs éléments font douter de la soutenabilité d'un tel scénario. S'il a été fidèlement suivi jusqu'ici, le *RCP8.5* est - et sera - alimenté par une augmentation de la combustion des énergies carbonées au cours du siècle. Différents éléments attestent de la difficulté croissante d'exploiter ces combustibles, ce qui pourrait avoir comme effet de limiter nos émissions de façons involontaire et incontrôlée. Pour autant, la précaution et l'emploi du conditionnel sont de mise lorsqu'il est question des projections d'extraction des énergies fossiles et des projections climatiques.

Applicable à de très nombreuses ressources naturelles, la théorie du pic identifie, selon le géochimiste Bernard Durand⁴, “le point critique à partir duquel un champ de pétrole [valable pour le charbon ou le gaz également, NDLR], ayant épuisé à peu près la moitié de ses réserves exploitables, est voué à terme à un déclin irrémédiable”. Cette théorie a semblé réfutée par l’essor non-anticipé du pétrole de schiste produit par les États-Unis. Pourtant, plutôt qu’un épuisement imminent des réserves naturelles, c’est la progressive complexification de l’extraction des combustibles fossiles qui pourrait réduire la quantité d’énergies fossiles disponible.

Depuis 2015, plusieurs études^{5,6,7,8} ont tenté d’envisager de façon plus fine les réserves exploitables d’énergies fossiles. Ces chercheurs en géologie pétrolière et charbonnière projettent une diminution drastique de la production au cours du siècle, contrairement à ce qu’envisagent les *scenarii* climatiques du GIEC. Ces différentes équipes arrivent à un résultat équivalent : il resterait, selon leurs estimations, environ 1000 Gt d’énergies fossiles exploitables. Non seulement le scénario *RCP8.5* semblerait dès lors impossible à alimenter, mais le scénario *RCP6.0* équivalent à un réchauffement de l’ordre de 3 à 4°C, ne serait pas, lui non plus, soutenable.

Des impacts toutefois considérables

Une thèse, menée par Yann Quilcaille et soutenue en 2018⁹, a permis le croisement d’un modèle climatique conventionnel avec les données de la géologie pétrolière et charbonnière issues de l’une des études précédemment citée. Les résultats indiquent qu’un déclin de l’exploitation des énergies fossiles conduirait à un réchauffement de 2 à 3°C. Le dernier rapport du GIEC a montré les différences importantes qu’implique un demi-degré de différence à l’échelle globale¹⁰. Une évolution de +2,5°C ou de +4,5°C n’aura pas la même incidence sur la récurrence et l’intensité des événements extrêmes : canicules, sécheresses, désertification et migrations forcées, ou encore cyclones. Toutefois, d’autres éléments que la disponibilité des énergies fossiles sont à prendre en compte dans les trajectoires climatiques, à commencer par l’usage du sol.

Par le passé, des prédictions erronées ont décrédibilisé les éléments scientifiques prouvant une limite à l’exploitation des énergies fossiles. Pourtant, l’apport d’énergie fossile est vital pour nos sociétés, et la visibilité sur la disponibilité du pétrole, du charbon et du gaz, est un sujet d’importance majeure. Le débat passionné, sur lequel s’enflamme l’écologie conventionnelle, entre le soutien aux énergies renouvelables ou au nucléaire, ne concerne que la production électrique, qui représente moins de 19% de l’énergie consommée à l’échelle globale¹¹. Le feu est ailleurs. Les énergies carbonées sont à la fois le pire ennemi d’un environnement durable, et la condition *sine qua none* du fonctionnement des sociétés industrialisées¹². Une baisse progressive ou soudaine de la production ferait subir des contraintes très fortes sur l’immense majorité des pays. En considérant que nos sociétés provoquent l’accentuation de l’effet de serre, le déclin de celles-ci, provoqué par la baisse de l’exploitation des énergies fossiles, sera peut-être notre meilleur allié pour atténuer le réchauffement climatique.

2) Article 2 : 8000 caractères, accroche centrée sur l'actualité :

Le réchauffement climatique, bientôt en panne d'essence ?

Ces dernières années, le débat médiatique au sujet du réchauffement climatique est phagocyté par les vifs échanges entre le camp climato-négationniste, incarné par Trump et Bolsonaro, et le camp progressiste aux prétentions climatiques dont Macron est le porte-parole. Pourtant, quels que soient leurs dirigeants et les ambitions qu'ils portent, depuis plus de deux siècles, les pays industrialisés n'ont eu de cesse d'augmenter leur consommation d'énergies fossiles. Le charbon, le pétrole et le gaz constituent l'apport énergétique de nos sociétés comme le sang irrigue nos corps.

Malheureusement, les atouts énergétiques incomparables des énergies fossiles ne dissimulent plus leurs revers. Parmi ceux-ci, le réchauffement climatique, déjà mesuré à +1°C par rapport à la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, est le plus visible et celui qui génère depuis peu une mobilisation citoyenne mondiale. Les climatologues considèrent que plus de 70% du phénomène est imputable à la combustion des énergies carbonées¹.

La trajectoire la plus climaticide

Malgré la signature de nombreux accords, théoriquement contraignants, engageant les États à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), la consommation combinée de charbon, de pétrole et de gaz n'a jamais été aussi importante. Aucune autre source d'énergie ne présente les avantages des énergies fossiles : prix toujours dérisoire par rapport à l'énergie fournie, praticité à l'usage, extraction facile et sûre. De manière que nos sociétés en soient directement tributaires. La combustion de ces ressources parfaitement naturelles est intimement liée au développement économique. L'idée d'un découplage entre recours aux énergies fossiles et croissance économique, soutenue par la promotion du développement durable et des énergies prétendument vertes, se révèle être un mirage². Les choix politiques et économiques continuent d'être pris selon le paradigme croissant, et nécessitent donc un recours aux énergies fossiles sans cesse accentué.

De ce fait, en dépit des discours marquants et des engagements vains, la trajectoire d'émissions de GES suivie par nos sociétés se confond ainsi avec le scénario le plus climaticide (appelé *RCP8.5*) envisagé par le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Pour autant, les modélisateurs des *scenarii* climatiques s'appuient sur les données des énergies fossiles publiées dans une étude géologique datant de 1997³. Ce travail ne mesure pas seulement l'énergie fossile encore extractible (les réserves), mais l'ensemble des ressources se trouvant sous terre, y compris ce qui semble inaccessible.

Ainsi, les trajectoires climatiques émises depuis se fondent sur l'hypothèse que nos sociétés seront capables d'extraire l'ensemble des énergies carbonées présentes dans le sol. Le scénario *RCP8.5* est alimenté par une consommation globale de 2100 gigatonnes (Gt) d'énergies fossiles d'ici 2100,

entraînant une hausse de la température globale de l'ordre de 4 à 5°C⁴. Dans ce bouleversement progressif de notre milieu, nos sociétés seront secouées par des événements extrêmes, certains territoires deviendront impropres à la vie humaine, et nos systèmes agricoles subiront des pressions inédites.

Une limitation involontaire de nos émissions ?

Ceci dit, plusieurs éléments font douter de la soutenabilité d'un tel scénario. S'il a été fidèlement suivi jusqu'ici, le RCP8.5 est - et sera - alimenté par une augmentation de la combustion des énergies carbonées au cours du siècle. Différents éléments attestent de la difficulté croissante d'exploiter ces combustibles, ce qui pourrait avoir comme effet de limiter nos émissions de façons involontaire et incontrôlée.

Applicable à de très nombreuses ressources naturelles, la théorie du pic identifie, selon le géochimiste Bernard Durand⁵, "*le point critique à partir duquel un champ de pétrole [valable pour le charbon ou le gaz également, NDLR], ayant épuisé à peu près la moitié de ses réserves exploitables, est voué à terme à un déclin irrémédiable*". Au milieu des années 2000, alors que certains, dont l'ancien ministre Yves Cochet, envisageaient dès 2008 une "*pétrole apocalypse*", les travaux scientifiques traitant du pic pétrolier ont été décrédibilisés et mis au ban des sciences environnementales. La raison ? Le spectaculaire et non-anticipé essor du pétrole de roche-mère (appelé injustement "pétrole de schiste") produit par les États-Unis. Rarement rentable, ce pétrole a permis, jusqu'à présent, la croissance de la production mondiale d'*or noir*. Plutôt que la solution de l'approvisionnement pétrolier de demain, l'agitation que suscite son exploitation ressemble davantage à une "*fête de départ à la retraite*" selon le géologue pétrolier Art Berman⁶. En effet, des éléments laissent penser que la fête touche peut-être à sa fin.

Depuis 2015, plusieurs études^{7,8,9,10} ont tenté d'envisager de façon plus fine les réserves exploitables de l'ensemble des énergies fossiles. Ces chercheurs en géologie pétrolière et charbonnière projettent une diminution drastique de la production au cours du siècle, contrairement à ce qu'envisagent les *scenarii* climatiques du GIEC. Ces différentes équipes arrivent à un résultat équivalent : il resterait, selon leurs estimations, environ 1000 Gt d'énergies fossiles exploitables. Non seulement le scénario RCP8.5 semblerait dès lors impossible à alimenter, mais le scénario RCP6.0 équivalent à un réchauffement de l'ordre de 3 à 4°C, ne serait pas, lui non plus, soutenable.

Le réservoir se vide, mauvais signe pour la suite du trajet mais bon signe pour demain ?

Une thèse, menée par Yann Quilcaille et soutenue en 2018¹¹, a permis le croisement d'un modèle climatique conventionnel avec les données de la géologie pétrolière et charbonnière issues de l'une des études précédemment citée. Les résultats indiquent qu'un déclin de l'exploitation des énergies fossiles conduirait à un réchauffement de 2 à 3°C. Le dernier rapport du GIEC a montré les différences importantes qu'implique un demi-degré de différence à l'échelle globale¹². Une évolution de +2,5°C ou de +4,5°C n'aura pas la même incidence sur la récurrence et l'intensité des événements

extrêmes : canicules, sécheresses, désertification et migrations forcées, ou encore cyclones. Toutefois, d'autres éléments que la disponibilité des énergies fossiles sont à prendre en compte dans les trajectoires climatiques, comme l'usage du sol symbolisé par le sort de l'Amazonie, ou encore la fonte du pergélisol arctique.

Le débat passionné, sur lequel s'enflamme l'écologie conventionnelle, entre le soutien aux énergies renouvelables ou au nucléaire, ne concerne que la production électrique, qui représente moins de 19% de l'énergie consommée à l'échelle globale¹³. Le feu est ailleurs. Les énergies carbonées sont à la fois le pire ennemi d'un environnement durable, et la condition *sine qua none* du fonctionnement des sociétés industrialisées. Une baisse progressive ou soudaine de l'extraction ferait subir des contraintes très fortes sur l'immense majorité des pays. À l'échelle nationale, des pays comme le Yémen, le Venezuela ou la Syrie ont connu leurs pics de production pétrolière dans les années 2000, et leurs situations, bien que liées également à d'autres facteurs, ne laissent pas présager d'un futur stable et serein pour un monde soumis à la déplétion énergétique.

La menace d'un monde soumis à des conditions climatiques défavorables est suffisante pour que le sujet entre pleinement dans le calendrier politique¹⁴. La déplétion pétrolière ne semble pas inquiéter autant. Pourtant, le déclin probable de nos sociétés sera causé tant par la dégradation des conditions environnementales que par la baisse de l'exploitation des énergies fossiles. Ce déclin constituera à la fois notre meilleur allié pour atténuer le réchauffement climatique, et le pire ennemi de la stabilité socio-économique des pays industrialisés. Par rapport à ces enjeux, les élucubrations et autres tweets de nos dirigeants semblent bien dérisoires.

3) Interviews :

Entretien avec Jean Laherrère réalisé par téléphone le 5/03/2019 :

- 1) Pourquoi les travaux de l'ASPO ne connaissent-ils pas un plus grand écho ?
 - Déjà, dans l'expression "peak oil", "pic" devient un adjectif, alors que théoriquement, l'ASOP marche mieux mais ça sonnait moins bien, notamment aux yeux de Campbell. En 1998 [année de la sortie de l'article "The end of cheap oil"] tout le monde a rigolé : "c'est complètement faux". Ce n'est qu'à partir de 2007 et du meeting de Cork, où l'ancien secrétaire d'Etat de l'énergie a dit "vous avez gagné" que le peak oil a été reconnu. La croissance est liée à l'énergie, donc la politique ne peut pas suivre. Les nazis voulaient aller à Bakou pour le pétrole, les Japonais en Indonésie. Ce qui a gagné [ce qui a permis de gagner la Seconde Guerre mondiale pour les Alliés] c'est le pétrole du Texas brut, face au pétrole synthétique à partir du charbon des nazis. Les travaux de l'ASPO ne sont pas reconnus parce que la croissance n'est pas compatible avec cette idée. Jean Tirole a écrit un livre sur l'économie sans employer le mot "énergie". La société de consommation actuelle est basée sur l'énergie bon marché, on dépense à tout-va, l'objectif désormais n'est pas de changer le système mais de changer le mode de vie, moins axé sur la consommation, et cela est très difficile à faire entendre. Paul Valéry disait que "le temps du monde fini commence".
- 2) Dans les années 80, la fin du pétrole était-elle envisagée à Total ?

- J'ai été mis à la retraite par Serge Tchuruk qui pensait alors à l'actionnariat, et à 60 ans au lieu de 65 comme prévu (baisse de l'âge de la retraite avec Mitterrand), puis j'ai été consultant pour Pétroconsultant, là où j'ai commencé à m'associer à Campbell et avec d'autres retraités. J'étais géophysicien à Total, en particulier sur les horizons profonds et rapides à l'aide des ondes sismiques, à la recherche de structures dans un système pétrolier avec une roche-mère qui a généré de l'huile et du gaz : Sahara, Australie, Canada... Ce fut de plus en plus difficile avec le temps, malgré une grande envolée vers l'offshore, plus loin, plus profond, toujours plus difficile de trouver des grosses structures (appelée "patates"). Bien plus tard, on a réalisé que les marqueurs sismiques sont liés aux évolutions climatiques.
- 3) Que pensez-vous des déclarations de Pouyanné indiquant qu'il faut davantage d'investissements pour aller plus profond, sinon l'approvisionnement pétrolier risque d'être très contraint en 2020 ?
- Regardez mes graphiques et tirez vos propres conclusions, les 2P décroissent depuis 1980, on vit donc sur les découvertes passées, on consomme plus de 30 milliards de barils et on en découvre entre 5 et 10 depuis dix ans. Dans les années 1980, à l'heure de la ruine de l'Union Soviétique, la hausse du pétrole saoudien a fait chuter les prix.
- 4) Pourquoi les majors ne se sont-elles pas précipitées sur le shale oil ?
- L'industrie du shale oil a des dizaines de milliards de dollars en négatif, il n'y a plus de place pour implanter des puits, malgré des puits horizontaux jusqu'à 4km forcément limités. Quelques grands puits sont exploités par les majors comme Exxon en Guyane, mais elles finissent par y investir car c'est tout ce qu'il reste.
- 5) La qualité du pétrole à raffiner, un vrai problème ? ou des solutions techniques existent-elles ?
- Désormais le pétrole est plus léger, moins énergétique, et c'est un problème. L'AIE [Agence Internationale de l'Énergie] est incapable de dire le pouvoir énergétique du brut avant 2015 (il était considéré comme constant) car ce n'était pas donné par les États. Le diesel devrait coûter 13% de plus que l'essence car il est plus énergétique et plus lourd.
- 6) L'AIE justement, basée à Paris, a, comme le FMI et ses prévisions de croissance, des *scenarii* trop optimistes (quand le GIEC envoie des milliards de tonnes de CO2 dans l'atmosphère), pourquoi ?
- Il ne s'agit pas de mensonges, mais tout dépend de celui qui écrit les rapports. Il faut savoir que c'est un club des consommateurs s'opposant à l'OPEP, et que l'AIE est financée par les Etats-Unis. Alors qu'un directeur disait dès la fin des années 90 qu'on avait besoin du non-conventionnel, son successeur ne pensait pas la même chose en 2000. En mer du Nord ils ont modifié les chiffres d'exploitation. Byrol est devenu patron permanent, il s'avère être un bon politicien mais pas un bon scientifique, il faut faire plaisir aux américains.
- 7) La production vénézuélienne va repartir ou l'exploitation est trop coûteuse ?

- La compagnie est décimée aujourd'hui, dirigée par des militaires incompetents. Total était intéressée en 1998 par ce pétrole lourd malgré un prix faible, l'Orénoque est un bassin chaud, l'huile y est fluide (par rapport à l'Athabasca), avec des puits forés en une semaine, jusqu'à 1000 barils extraits chaque jour pour une pompe. Un contrat de 35 ans était signé, avec du LTO [light tight oil] disponible là-bas aussi. La politique de nationalisation a coupé court à cette dynamique de production. Le problème c'est la confiance. Ceci dit, c'est visqueux, pas transportable par pipe sans utiliser de diluant pour le rendre plus léger, donc ça nécessite des investissements considérables, pour le raffiner sur place. Il faut qu'une compagnie ait confiance et puisse avoir un contrat de 35 ans à respecter et puisse y investir des milliards. Il faudra 2 ans au moins pour produire 1 millions de barils par jour, voire plusieurs dizaines, car ça reste le plus grand bassin du monde. Le problème est à la fois du "below ground" et du "above ground", la géologie et la politique. J'ai davantage de doutes sur les réserves saoudiennes (comme sur les autres réserves d'ailleurs).

8) Quel mode de vie pour vos 100 ans [J. Laherrère est né en 1931] ?

- J'ai toujours ma voiture, c'est un outil de déplacement, toujours à essence, achetée au garage local, la voiture la plus économique possible, alors que la plupart des gens voient ça comme un plaisir et une domination. Mais l'homo sapiens s'adapte par définition, par force, ou par idéologie. Je suis désolé par le manque d'honnêteté des scientifiques, et même si je n'ai pas vu arriver le shale oil, les éléments sont suffisamment solides pour douter de la suite de l'exploitation pétrolière.

Gilles Ramstein :

- Auzanneau, énergie déterminante, puissance politique, capacité énergétique extrêmement forte et disponible
- vidéos de Jancovici
- Jacques trainer physicien, il a réfléchi aux scénarii du giec et à l'énergie (ramstein doute sur les scénarii)
- la question des scénarii est à étudier, très narratif, fait par des économistes

Entretien avec Jacques Trainer réalisé par téléphone le 12/03/2019 :

- 1) Remettre en cause la "faisabilité" d'un scénario du giec, est-ce facile ?
 - Il est très facile de remettre en cause les scénarii du giec car le taux de croissance du pib est exogène, on envisage 2% quoi qu'il arrive. C'est un exercice sur lequel les climatologues se sont mis d'accord : faire des trajectoires correspondant à des RCP définis à l'avance, on peut toujours le faire, mais on ne s'est pas posé la question de la possibilité de suivre ce scénario, alors que le pic est dans le siècle pour tous les fossiles. En général, chez les économistes, la loi prix/demande ne s'applique que partiellement.
- 2) Pourquoi n'y a-t-il pas de géologues/énergéticiens au giec ?

- La discussion entre les scénaristes et les géologues est nécessaire même si ce choix n'a pas été fait. Les climatologues sont réticents car ils ne veulent pas tout mélanger à la fois, les ressources c'est compliqué car il y a de la géopolitique derrière, des "assets" (valeurs des actions) dépendantes des réserves, investissements redirigés... Il y a déjà assez à faire avec le climat et les projections, il suffit de voir l'évolution du climat entre le Sud de la Méditerranée et le Nord de la Méditerranée, on perçoit déjà les changements en cours sans pousser jusqu'au scénario RCP8.5.

3) Les hydrates de méthane prendront le relais des énergies fossiles conventionnelles ?

Je n'en ai aucune idée, mais *a priori* ça paraît difficile à exploiter. Par contre, comme pour l'exploitation gazière, les fuites de méthane sont une catastrophe,, les fuites à la production et à l'utilisation sont à étudier et à mesurer, car elles sont bien sous-estimées.

4) Que pensez-vous des réserves formulées sur le renouvelable et leur substituabilité ?

- D'après Fredrich Wagner, la limite est à 40% de renouvelable max dans le mix électrique. Il a mis au point une méthodologie pour étudier cela au niveau allemand, d'autres ont extrapolé. On peut optimiser un mix éolien/solaire qui minimise les fluctuations, à l'année selon ensoleillement/vent, combien faut-il de back up car on ne lisse pas tout ? Le stockage tel qu'envisagé n'est pas suffisant. 35% à 40% pour l'électricité au maximum.

5) Que pensez-vous de l'idée d'une carte carbone individuelle ?

- Pourquoi pas ? Toute idée qui contribuerait... Mais il y a des pièges, on ne peut pas réduire ces éléments aux comportements individuels : l'élec/hab : 8mwh/an en France comme en Allemagne. Si on regarde la conso des ménages, c'est 3,5mwh/an (pour 2,3 habitants). La différence se situe dans le fonctionnement de la société : société/industrie/services publics/TGV/concerts... quand on réduit à l'individu on limite la réflexion. Un autre problème est celui du recyclage, c'est une ressource. Dès qu'on pense système énergétique, les énergies renouvelables utilisent des matériaux non-renouvelables. La somme de matériaux est plus importante que pour les pilotables. Je n'adhère pas complètement aux idées de Bihouix sur le "low tech" car la "tech" n'est pas forcément le problème, avec du high tech renouvelable imaginons, pourquoi pas ? Low tech veut dire aussi low science ? Il faut réfléchir au recyclage surtout.

6) La décroissance énergétique amènera-t-elle la décroissance économique ? Le socio-système y est-il préparé ?

- On peut travailler à l'efficacité énergétique (1%/an), mais c'est difficile et limité. L'industrie essaie d'optimiser les process. L'agriculture peut avancer. Petros Chatzimperos travaille sur l'énergie en agriculture. La surconsommation existe : publicités pour les bagnoles etc... Mais l'association Négawatt a une idéologie très forte : diminution envisagée, mais comment est-ce possible ? Si l'objectif est la diminution du CO2, en France ça passe par l'électrification des usages : isolation et PAC [pompes à chaleur] en premier lieu. Mais ça suppose d'augmenter la consommation d'électricité ! Diminuer la consommation électrique c'est surtout diminuer le nucléaire, c'est donc une démarche idéologique, car les énergies renouvelables sont incapables de prendre le relais en l'état.

7) Quid de l'acceptabilité sociale d'une intermittence de l'électricité ?

- Difficile à imaginer. Le black out au Vénézuéla rend tout difficile : pour les malades notamment, notre socio-système n'est pas prêt à s'adapter. Tous les processus industriels fonctionnent mal en régime variable, il y a des points de fonctionnement optimum, mais il semble difficile de résister à une variation de l'apport énergétique à l'avenir. La majorité de l'énergie est utilisée pour le fonctionnement social (services notamment). Le fonctionnement d'un hôpital avec une éolienne est difficile à envisager. L'exemple allemand est intéressant, car malgré 100GW de puissance intermittente, ils n'ont pas diminué la puissance pilotable fossile, ils ont donc doublé la puissance pilotable qui existait. La première des choses à faire pour les politiques publiques c'est d'analyser cet exemple.
- 8) Une réduction drastique de l'apport énergétique mène-t-elle forcément à un effondrement ?
- Réduire de 20 à 30% l'apport énergétique est faisable, à travers des bâtiments mieux isolés notamment. Il faut réfléchir aux transports aussi, sans que ça ne pose de problème dramatique. Il faut et on peut. On permettrait alors aux pays émergents de se développer. En revanche, diviser notre apport énergétique par 4, ou réduire à néant l'emploi carboné, je ne vois pas comment. Pour faire évoluer les choses, il faut garder le sourire, et ne pas sous-estimer la vertu pédagogique des catastrophes, comme Pearl Harbor, qui a fait basculer l'opinion états-unienne auparavant non-interventionniste.

Bonus :

- il faut aussi penser à des évolutions non-pacifiées, sur une trajectoire de 3°C a minima, il faut regarder ce que ça donne sur le plan géopolitique. Pour savoir où ça menace, il faut regarder les rapports militaires : eau, agriculture, déplacements de population, possibilités de guerres... les choses se reconconditionnent. Livre de Dyer "climate wars", des jeunes militaires retraités parlent de cette question avec une parole un peu plus libre.
- décrire les phénomènes, regarder les inerties face au réchauffement, ça peut mettre l'accent sur les raisons de pourquoi on n'y arrivera pas.
- Thunberg sur la parole d'espoir : "mais j'attends pas de la parole d'espoir, j'attends de la panique".
- Garder le sourire, on peut dire les choses avec le sourire, dire à quel point on est dans la merde, en rigolant. L'humour peut être un levier. Lecture du monde passionnante. Aux Etats-Unis : opinion publique non-interventionniste, voire sympathisante avec les nazis face aux soviets, un événement a fait basculer l'opinion : pearl harbor. Ils ont décidé de fabriquer tanks et avions plutôt qu'autre chose. Vertu pédagogique des catastrophes, il faut compter là-dessus. Il faut espérer qu'elles soient de faibles amplitudes.
- Les collapsologues s'appuient sur des exemples de physique statistique, ce sont des toy modèles qui permettent de comprendre mais qui n'ont pas de capacité prédictive, ce n'est pas grave (modèle 3 prédateurs, tout le monde finit par mourir), mais quand on a un vrai système écologique avec des interactions innombrables, mais on ne peut pas prédire quoi que ce soit. Plus d'échelle de temps, plus que le repli/effondrement et des dynamiques communautaires et plus de pensée politique.

Entretien avec Philippe Gauthier réalisé par téléphone le 13/03/2019 :

- 1) Dans votre conférence au festival de la décroissance, vous évoquez la multiplication délirante des moyens à mettre en oeuvre pour se convertir au tout renouvelable, pourquoi n'est-ce pas entendable ?
- Il s'agit là d'un facteur 60, les renouvelables (éolien et solaire) représentent toujours 1,5% de la production mondiale primaire, tandis que les fossiles arrivent entre 81% et 85%, d'où mon chiffre. L'électricité est plus efficace (rendement supérieur) que les fossiles, mais comme on est censé doubler notre économie d'ici 2050... On n'a jamais fait quelque chose comme ça dans l'histoire de l'humanité, transformer 100% des fossiles en renouvelable (ou même en nucléaire), dans un délai de 31 ans, ça ne s'est jamais fait, et surtout les transitions énergétiques du passé n'ont jamais permis l'abandon, c'est une addition. On utilise plus de bois qu'en 1800 et plus de charbon qu'en 1900 en chiffres absolus.
- 2) Considérez-vous votre blog comme impertinent ? Ou alors est-ce du journalisme scientifique *stricto sensu* ?
- Le but n'est pas d'être impertinent, j'écris de façon pas confrontante, pas dans le but de provoquer. Il y a une voix étroite entre le scepticisme vis-à-vis du renouvelable, et ceux qui ont des attentes démesurées pour le renouvelable. Les pro-nuke semblent malhonnêtes, ils supportent le nuke en noircissant le renouvelable, alors que Jancovici se montre plus prudent. Au sujet du pétrole, Laherrère m'a expliqué que le Oil and Gas Journal, pour lequel Laherrère a travaillé par le passé, fait confiance aux pays pour demander leurs stocks. Deux problèmes peuvent être perceptibles : les recherches au début du mois de décembre pour publier cela en janvier (déjà biaisé pour un mois), et aussi, plusieurs pays ne se donnent plus la peine de répondre, le journal considère donc que les chiffres n'ont pas bougé. La référence internationale est donc pourrie. Les chiffres sont surestimés et les données sont non-vérifiées. Certaines agences de scouting compilent les données, de différentes sources pas seulement officielles, celles-là ont des chiffres plus précis, rarement rendus publics, seulement grâce aux grandes entreprises, Rystad en est un exemple plutôt fiable. 265 milliards de barils annoncés par l'Arabie Saoudite, selon Rystad le chiffre réel est plus près de 160 milliards. La question de la fiabilité des données empoisonne les débats entre chercheurs. L'agrégat est d'une fiabilité douteuse voire incertaine. Au sujet du charbon, il est moins abondant qu'on le dit, la production ne peut pas être soutenue, une décroissance aura lieu pour des raisons géologiques, et bien qu'il y ait progressivement un manque de demande, le facteur limitant sera géologique.
- 3) La décroissance énergétique mène-t-elle à la décroissance tout court ? le socio-système y est-il préparé ?
- On n'est pas sûr que les deux choses s'opposent, les entreprises prévoient jusqu'à un certain point même si elles ne voient pas très loin, ça se limite à 5 ans. Il n'est pas sûr non plus que les fossiles soient si rares et si coûteux, un peu plus qu'aujourd'hui soit, et le prix du pétrole ne peut pas augmenter trop sinon la demande réduit. Il y a des formes d'extraction extrêmes qui risquent de se tarir. On détourne des ressources pour garder le robinet énergétique ouvert (shale oil), nuisant à d'autres activités industrielles, commerciales, sociales... Mais comme le fossile est prioritaire, sa non-rentabilité est donc acceptée. Le schiste américain est très coûteux actuellement dans la production mondiale, le bitume canadien ainsi que quelques pétroles lourds, mais dans l'ensemble ça représente peut-être 10%, le reste est toujours à des prix raisonnables pour que ce soit rentable. La question du coût d'exploitation est

souvent une question du coût marginal, c'est ajouter une unité supplémentaire qui coûte cher, les niveaux d'exploitations sinon restent gérables.

4) Les positions et les articles climato-sceptiques de Laherrère, est-ce que ça décrédibilise tout son discours ?

- Il faut s'en détacher, je n'en tiens pas compte. Sur les questions de déplétion il est très fort, le reste ce n'est juste pas son domaine. Ceci dit il n'a pas le discours climato-sceptique dominant, il n'est pas intéressé, ça apparaît plutôt comme une réaction de repli.

5) Qu'en est-il du débat autour de la déplétion au Québec ?

- Au Québec le discours sur l'énergie est mort, et la raison principale c'est Hydroquébec. Il n'y a pas de débat sur la transition, la société est très opaque, très proche de l'État, très peu de données filtrent. Au sujet du prix de l'électricité peut-être mais le débat s'arrête là. Il y a des essais d'éoliennes mais ça s'est fait dans un programme conçu pour aider la société à se développer plutôt qu'à la consommation, le déploiement est trop politisé. Les producteurs privés vendent l'énergie éolienne à 11 cents du kwh, contre 8 pour Hydroquébec. Ici le solaire et le photovoltaïque ne pas adaptés, il y a plusieurs mois sans soleil (janvier 80 ou 85 heures d'ensoleillement), alors que la demande hivernale est très forte pour le chauffage. L'éolien semble plus stable mais il n'y a pas de besoin réel. Il y a en réalité un surplus d'électricité du fait des nombreux barrages, on tente de vendre l'électricité aux voisins. Les transports électriques sont développés par le gouvernement pour absorber ce surplus, mais le développement est très lent. L'électricité revendue aux industriels est presque gratuite, les Québécois consomment beaucoup car on produit beaucoup d'énergie et que notre industrie est énergivore, notamment l'aluminium (même s'il y a du gaspillage).

6) Que pensez-vous de l'instauration d'une carte carbone ?

- Au fond il s'agit une carte de rationnement, et sur le principe c'est intéressant. En pratique comment faire ? On a du mal à s'entendre sur la quantité de carbone liée à la production de tel ou tel objet, donc la mise en application s'avère difficile. Et je ne parle pas de la question de l'acceptabilité sociale. On dit que le rationnement est inacceptable, mais on accepte très bien des systèmes de rationnement par le prix, si tu es riche tu peux déjà te les procurer, si tu es pauvre tu es limité. Si on voulait mettre cette chose-là en branle, préparer son implantation, il faudrait le présenter de cette manière-là. Il y a une question de justice sociale là-dedans. Les taxes carbone ne font déjà pas l'unanimité...

Entretien avec Gail Tverberg réalisé par courriel le 9/03/2019 :

1) Why aren't we able to see the relation between oil, coal and gas supply, and economic growth ?

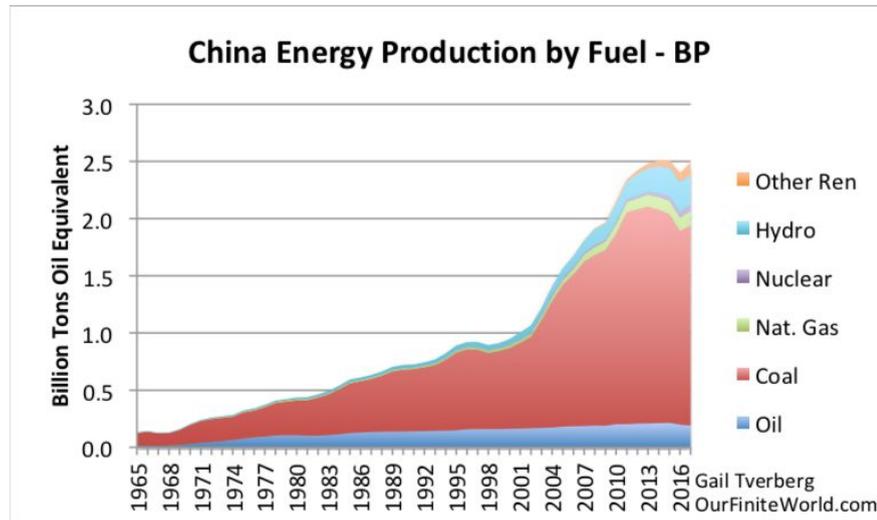
- The fundamental issue is that government leaders aren't trying to figure out the real story, to any significant extent. Economists, over a long period of time, have put together a story whose outcome politicians like. The story economists put together indicates that energy is not really needed to make the economy operate. Somehow, the future can be determined by fitting curves to past data. Also, economists believe that if the economy is not producing output up to its potential, actions by

government leaders (more debt, lower interest rates, more government spending) can make the system grow more quickly. With this story, everything is permanently under the control of government leaders. We will never run short of energy resources. We can have whatever outcome we would like. With this story, the only thing we need to worry about is climate change, if we use fossil fuels to too great an extent.

The real story is that economies require energy consumption, because it takes energy of various types to cook food, transport goods, smelt ores, and to create the many goods and services created by an economy. Even electricity requires energy inputs of many types. Solar panels and wind turbines can only be made with fossil fuels. Hydroelectric dams and nuclear power plants can only be built with fossil fuels. Back when the world population was under one billion, the world could get along with only some traditional types of energy (human energy, energy from draft animals, energy from burned biomass, plus energy from water captured in water wheels and wind captured in sails). With our current population, we have no alternative but to burn large quantities of fossil fuels, to provide enough energy to operate our economy. In fact, there is a close correlation between growth in energy consumption (fossil fuels, plus some other “modern” types of energy) and world GDP growth, evaluated on a worldwide basis.

2) You seem worried about China coal supply and the massive debts contracted by the middle class, do you think this relation can be the spark of the next global crisis ?

- I think that China and its debts may indeed be one of the factors sparking the next global crisis. China's declining coal supply also enters into this situation.
- China has built its economy on coal. The fact that coal is an inexpensive fuel has allowed China to sell the goods it manufactures for a lower price than countries manufacturing goods using a higher-priced mix of fuels. China uses coal in many ways: to make concrete to build roads and apartment buildings, to power public transportation (such as trains and trolley busses), to produce nitrogen fertilizer for crops, and to make electricity to use in manufacturing. It even uses coal to make electricity-powered vehicles, and powers them with electricity made from coal. China is the biggest consumer of plug-in EVs in the world. Without coal, China would need to substitute more expensive fuels, making the goods it produces more expensive. Also, if a higher-priced fuel were substituted for coal, Chinese workers would need higher wages to maintain their standard of living. All of these higher costs would make China less competitive in the world market. So China really needs coal, and its coal must remain low-cost to produce. In recent years, the inexpensive coal that China produces has started to deplete. China does indeed have a great deal of coal in the ground, but it is in thinner seams, or deeper in the ground, or farther from markets, making its delivered cost higher.
- When China's coal was very inexpensive to extract, getting an adequate selling price for the coal (compared to the cost of production) was no problem. But now that China's cost of production is starting to rise, the market price available for coal tends to be too low for quite a few coal mines to be profitable. In fact, the chart below shows that China's top year for coal production was in 2013. Production needed to be reduced, because at available market prices, its extraction was unprofitable for many mines with rising costs of production. Importing coal does not really fix this problem because long-distance transport adds to the cost of coal. Also, the quantity of coal that China would need to import would be huge. China's coal use accounts for about half of the world's total coal consumption, so it becomes difficult even to try to compensate for the shortfall.



- China does have a small amount of oil production, but it is also declining in quantity. The reason, again, is that China's cost of production of oil is above the market price of oil for some fields. In these fields, production must stop because it is no longer profitable to extract. When China's coal and oil problems are put together, it cannot continue to grow as rapidly as it would need to, even with imported fuel, because there is a need for a rapidly growing cheap fuel to substitute for China's now more expensive to extract coal (and oil). Wind and solar don't really fix the problem either. The wind and solar that China has put in place are included in the tiny orange "Other Renewable" sliver in the top of the chart. Even though China's wind and solar are the largest quantities in the world, they are still insignificant in comparison to its overall energy needs.
- If China is to continue its economic growth through exporting manufactured goods to the rest of the world, it needs a rising supply of very cheap energy supplies. The problem is that there is nowhere to purchase sufficiently low-cost energy supplies, especially in the quantity China requires. It will need to cut back in producing everything from condominiums for its own people to goods for export.
- The problem when cutting back takes place is that many people are likely to lose their jobs. This is one reason for debt defaults by Middle Class citizens. With many people losing their jobs, some will default on their loans for their homes. In addition, the reduced number of prospective buyers can be expected to lead to lower selling prices for condominiums. Citizens will be very unhappy about this. Many people have their life savings tied up in condominiums that they are not living in. If these homes start losing value, people who have their life savings tied up in them will also want to sell, pushing prices down even further. Both owners of these homes and builders of new homes may default on their loans. Ultimately, many types of debt defaults may affect world markets. When put together with other problems around the world, it seems likely that the world is headed for a very severe and permanent recession, or even worse.

3) You consider solar PV as a waste of money and energy, do you think there is a solution to keep energy supply for our societies ?

- "No," I don't think we will find a solution. Wind and solar don't scale up, as can be seen in the China example. They also are intermittent, creating problems for other electricity producers. If they are allowed to "go first" when they are available, other electricity providers need to be subsidized, so that their profitability doesn't fall too low.. We have been trying since at least the 1970s to find new, inexpensive sources of energy supply. Nuclear was better than wind and solar. At this point, we are quickly running out of time and options.

4) Is "degrowth" still a dirty word for politics ? And why ?

- I am not convinced that de-growth is real possibility. Fuels (such as coal and oil) leave us through prices that are too low for the producers. It is difficult to work around this problem of lower prices than producers need.

People who are interested in de-growth seem to think that energy prices will rise, and it will be possible to substitute more expensive fuels and more expensive (but less fossil fuel intensive) approaches to tackling problems. This isn't the way the system works, though. Higher prices are a sign of inefficiency in production. It is difficult to pass these higher costs of production on to consumers as higher prices. We are not in charge of this process; the laws of physics are in charge of this process. The system tends to collapse, as energy supplies fall too low to maintain the system.

I think de-growth is simply a myth, put together by people who think politicians are in charge of the economy.

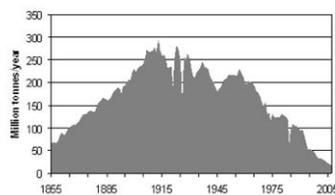
5) Do you consider that we the Western people are able to accept the energy decline without cutting government's heads ? We'll be forced to adapt, but can it be without outbreak of violence ?

- I don't know how this will end. I do know that about 100 years ago, the peak in coal production in the UK seems to have led, indirectly, to World War I. I can also observe that the peak in coal production in Germany seems to have led to World War II. Based on this observation, an energy decline might lead to another world war.

Peak coal in UK occurred at time of World War I, and Peak Coal in Germany at time of World War II. Led to Wars?

Peak Coal in UK, at time of WWI

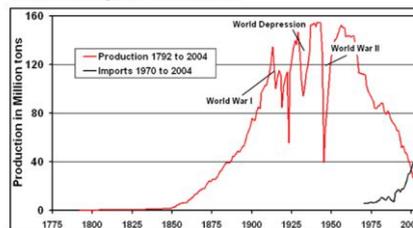
Coal Production in the UK by David Strahan



Source: <http://www.davidstrahan.com/blog/?p=116>

Peak Coal in Germany, at time of WWII

Hard Coal production in Germany (today's borders) 1792-2002 and imports 1975-2002.



Hard Coal production in Germany (today's borders) 1792-2004 and imports 1970-2004 Source: BGR Source: BGR https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Bilder/Kohle_Reserven_Bild1_en.html?nn=1547280

- I suppose local violence is a possible outcome. But there are other possible outcomes. Outbreaks of epidemics are often take place at the time of collapse. Collapsing governments, in the manner of the collapse of the central government of the Soviet Union (an oil exporter), after an extended period of low oil prices are another possibility. Financial collapse, far worse than that in 2008-2009 recession is yet another possibility . I suppose that some sort of religious ending is possible, since our problem this time is worldwide. But we really don't know for certain how things will turn out.

1) You work on it since many years, why are oil price so hard to predict ?

- I don't think that oil prices are hard to predict. Most people are focused on news events and the superficially informed views of analysts who have no background or work experience in petroleum.

2) Why did the majors suddenly get into shale oil ?

- Major oil companies have gradually—not suddenly—become involved with tight oil plays. Part of this is because their boards of directors and investors want them to be in the emerging mainstream that emphasizes shale plays. Perhaps more importantly is that they have had increasing difficulty replacing reserves in recent years and shale plays have big reserves. The return on capital employed in shorter term tight oil projects is much more attractive than the return on longer term projects offshore.

3) Shale has been seen as a new opportunity, but you said it was a "*retirement party*", how can you explain it ?

- It is a retirement party because it is the play of last resort—producing the oil source rocks. It reflects the reality that other plays with large reserves have been effectively exhausted.

3) Investors are becoming more skeptical about shale/lt, if they decide to pull out of shale business, can the exploitation stop quickly ?

- This is another news cycle perception that is not supported so far by data.

4) Jean Laherrere explained me that Russian shale was so complex to extract, is there another stock somewhere to operate ?

- Russia is at an early stage in tight oil development because it has ample reserves of conventional oil.

5) What is the most important to consider : EROEI or the balanced price between consumers and producers ?

- Profitability is the only factor to consider. The public will never understand EROI. EROI data is so poor and incomplete that I cannot use it effectively although I think it is important. Most independent oil companies are principally interested in "profit" measured by the increase in their stock price. That is correlated with oil price. Investors understand that oil is the foundation of the modern economy and will probably always invest in oil companies.

6) According to you, what's the global barrel production price that can make the whole system unstable ?

- The system is more reliant on capital supply than on any price or fundamental factors. As long as investors provide capital, the system is stable.

7) Oil quality seems to erode year after year, is this a real issue or refineries can deal with it ?

- It is a real issue but it is not because tight oil is low-quality. The problem with tight oil is that it does not contain sufficient middle distillates to manufacture diesel, jet and shipping fuel without blending with heavier oil.

Entretien avec Nafeez Ahmed réalisé par courriel le 29/05/2019 :

1) The cost of oil production tend to rise for geological reasons, according to you why do the medias don't talk about it ?

- There has been some acknowledgement in the press about higher costs of production, but for the most part both the press and general society operate in a framework premised on the idea of techno-optimism. There is therefore a tendency to downplay the idea that technology, particularly related to fossil fuels, might be problematic and not as efficient as hoped.

There is a context here that is somewhat understandable - peak oil theorists for years predicted that the peak in conventional oil production would lead prices to rise inexorably. But that didn't happen, proving that the models behind those specific predictions to be flawed. In reality, conventional oil production did peak and plateau between 2005 and 2008, and continues on an undulating plateau; but the extent to which unconventional resources would be mobilised and contribute to a different economics within the oil industry was underestimated. This has led many pundits to assume that since the peak oilers were wrong about the prices, their entire notion of resource scarcity is flawed.

That has led them to downplay the evidence that the economics of the shale industry could well be unsustainable - financed largely by burgeoning debt, the higher costs of production mean that many shale companies are barely breaking even. How long that can continue is an open question, but either way, it means that the quality of the resource is diminished. It still takes more energy to produce that oil than it did with conventional oil. This leaves less surplus energy for society, and partly explains why coinciding with this period we have entered a period of prolonged slow economic growth. Journalists, though, are not usually trained to report on complexity and so this sort of analysis ends up being left out of the equation. It also doesn't help that most energy journalists who want to be able to access the industry would lose access if they went down this sort of critical road, leaving them disincentivized from reporting or investigating such issues.

2) In your book "*Failing states, collapsing systems : biophysical triggers of political violence*" you wrote that the EIA admitted that the world reserves in the 1980's were a bunch of lies. Why is it so important for countries to claim that they have more oil that they really have ?

- Oil producers often are incentivised to demonstrate maximum reserves in order to encourage maximum possible investment into their industries. Especially larger producers, like Saudi Arabia for instance, who plays an instrumental role as a global swing producer regulating global prices, are expected to have larger reserves to maintain stability. if they admit lower reserves, this could jeopardise a coveted position in the international system.

3) In France there is a beginning of popularization of this point of view/approach, how is your work about collapse is received in England ?

- In the UK I'd say this idea of potential collapse is still very nascent. It's beginning to be taken more seriously, as movements like Extinction Rebellion and the Youth Climate Strikes demonstrate.

4) The youth standing in the streets in Algeria wants more democracy and a president who does more, has it a link with the decrease of oil and gas exports ?

- I haven't studied the case of Algeria myself, but there is abundant evidence that the Arab spring was partly triggered in the context of major oil exporters - like Syria, Egypt and Yemen - experiencing conventional production peaks that led their state revenues to haemorrhage. That in turn led to govt subsidy slashes. Simultaneously climate pressures drove food price spikes globally that impact ordinary consumers. The combination was devastating. It is highly likely that the growing unrest in places like Algeria is part of this deeper process re-emerging given that the systemic and structural problems that created the crisis the first time round were never dealt with.

5) Is the end of cheap oil a way to solve global warming (in a way we will not be able to emit enough CO2 to follow scenarii like RCP8.5) ?

- Unfortunately no. First of all, we should be clear that oil is still relatively cheap from a market point of view - though from a production and environmental point of view it is increasingly expensive due to more expensive drilling technologies which are more environmentally problematic. The problem here is that total production is still likely to rise, even as resource quality declines - this means that while total production will likely continue, driving greater CO2 emissions, more energy will be needed to sustain production, leading to a decline in net surplus energy available for society. Further, most climate models are too conservative and underestimate Earth System sensitivity - which means that even with relatively modest increases of CO2 in coming years, we are still at risk of triggering potentially abrupt and worst-case scenario climate events that could leave us with an uninhabitable planet.

6) When the production will be unable to follow consumption, what kind of violence can we have ?

- The issue of oil production vs consumption is part of the old paradigm. A better approach is to focus on EROI and the net surplus energy available for societies. When that declines too much due to the shift from conventional to unconventional energy we begin to see that current levels of societal consumption become increasingly expensive and unsustainable, due to the declining resource quality. Eventually it reaches a point where large enough sections of society feel disenfranchised enough to take protest action of some kind. In that context, there is the potential for violence depending on the political context; how states and social groups respond to the outbreak of unrest determines whether it becomes more violent, or not. As we saw in Syria, a certain type of approach that completely ignores the deeper systemic, climate and resource drivers of unrest can lead to prolonged violence and even the outbreak of protracted regional conflicts which draw in extremists of all kinds. Syria is a worst case example of how bad things can go - and should provide a warning sign for the rest of us.

7) If we have not oil anymore there will be violence (as Irak 2003) to get the last profitable barrels, in a long term dynamic, is it worth it ?

- We are not running out of oil - there are vast quantities of oil remaining and we it will never 'run out'. However, it will become more and more expensive to extract and as we do so, this will impact economic growth. Is it worth it? Only if you're the CEO of a large oil company like ExxonMobil and want to retain your market share and profits at any cost would no regard for the planet or people. Which is why Exxon systematically lied about climate change for decades. What this analysis proves is that we need to get ourselves free from fossil fuel dependence as soon as possible and find ways to sustain a new form of prosperity and well-being based on clean energy.

8) Do you think the western populations will be resilient and "polite" with their government with less oil ?

- No. The West has already moved into a situation where energy is actually more expensive - it has already brought with it fundamental dysfunction, which I predicted years ago: the mainstreaming of the far-right, the rise of Trump, Brexit in the UK and demands for 'Frexit' in France, along with the rapid growth of Euroscepticism in the EU are all symptoms of the shift into an age of declining resource quality where economies are stagnating, causing people to fundamentally question the prevailing liberal order and value-system. While the US shale oil bonanza has grown on back of billions of dollars in debt that may turn out to unrepayable; Europe is already a post-peak oil continent where most of its oil producers have peaked in conventional oil production; Russia is widely forecast to be approaching a peak in the next few years. Currently, the primary sources of growth out to 2030 are in the US and Middle East. But really, the most critical issue is not simply about when or if production peaks - in some ways that misses the point. Irrespective of production peaks, the critical factor is EROI. EROI will continue to decline even if production continues to grow. And that means that economies will continue on a trajectory of deep instability while population and consumption demand rises. And as this continues, societal volatility will be compounded by the impact of climate pressures if we continue business-as-usual. In this sense, the unrest and volatility we're seeing over Trump, Brexit and Frexit is just the beginning. As states find that the conventional toolbox is running out of steam, the shift to more extreme politics - and with it a politics of violence - is the greatest risk to our democracies. Either way, the only solution is to get off fossil fuels and transition to new, more sustainable forms of economics.

Entretien avec Yann Quilcaille réalisé par courriel le 24/06/2019 :

1) Parmi les périls environnementaux qui pèsent sur nos sociétés, l'étude du pic pétrolier est un domaine à part entière. Les climatologues sont-ils familiers de cette question ?

- Je pense qu'à peu près tous les climatologues ont au moins une idée de ce à quoi ça correspond. Après, chacun sera plus ou moins familier avec : tous ne connaissent pas par cœur les estimations des ressources restantes. En fait, il faut se rappeler que parmi les sciences du climat, et encore plus dans celles de l'environnement, il y a un spectre large et continu de combinaison de compétences et connaissances. Ceux qui travaillent avec des scénarios auront souvent une idée plus précise des ressources restantes de pétroles que ceux qui étudient l'acidification des océans, par exemple.

2) Les scénarii "business as usual" sont les plus plébiscités mais les études sur le devenir des énergies fossiles laissent entrevoir une baisse de l'extraction dans les années/décennies à venir, comment intégrer ces éléments dans les scénarii du GIEC ?

Plusieurs points sur cette question :

- Les BAU sont effectivement les plus utilisés, mais pour cause, c'est parce que nous avons besoin d'une référence. Si ma question est « qu'est-ce que ça changerait de ... ? », je ferai un scénario avec changement et un scénario sans, un BAU donc, pour pouvoir comparer.
- Il est difficile de parler des « scénarios du GIEC ». Le but du GIEC est de rassembler les résultats et analyses de toutes les équipes de recherche. Et souvent, ces scénarios sont en fait des éléments d'exercice d'intercomparaison de modèles. L'idée est d'utiliser les mêmes scénarios par de nombreux modèles, comparer les résultats, sur quoi s'accordent les modèles, expliquer les différences, comprendre où nous en sommes des connaissances, comment améliorer les modèles, etc. Et grâce aux nombreux exercices d'intercomparaison organisés au travers du monde, le GIEC peut récupérer ces résultats pour les synthétiser. Pour autant :
 - o Pour le Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emissions (IPCC SRES), un besoin d'analyse des futurs climatiques possibles avait été formulé, d'où la création des scénarios SRES et du rapport. Donc là, oui, nous pouvons parler de scénarios du GIEC.
 - o Ensuite, les scénarios RCP ont été créés, avec déjà dans l'idée de faire les SSP. Là, nous ne pouvons pas parler de scénarios du GIEC. Question de timing, les résultats du 5^e rapport du GIEC (AR5) qui concernent des scénarios sont basés sur les RCP pour le 1^{er} groupe de travail, et pour le 3^e, sur un ensemble de scénarios d'exercices d'intercomparaison de modèles socio-économiques.
 - o Pour le Rapport Spécial sur le 1.5C, de nouveaux SSP ont été créés. Mais ce rapport utilise aussi des scénarios qui n'ont pas du tout été créés pour ce rapport...
- Maintenant, pour la question en elle-même : la quantité de ressources disponibles sont déjà intégrés dans les modèles socio-économiques appelés IAM (pour Integrated Assessment Model). L'idée générale est qu'on va supposer au début du scénario qu'il y a une certaine quantité d'énergies fossiles enfouies. Le calcul est lancé, et là, beaucoup de choses interagissent : la facilité d'accès des ressources, le prix de la technologie, du baril, la demande, des politiques de réduction des émissions, etc, tout va concourir à déduire une quantité de ressources extraites, traitées, utilisées, etc. Et nouvelle étape, on recommence au pas de temps suivant. En général : on extrait, ça coûte plus cher à extraire, on produit moins, la demande augmente, le prix du baril augmente, ça devient rentable d'extraire des énergies fossiles. In fine, la baisse à venir dans l'extraction des énergies fossiles est représentée par ces IAM. Cette baisse dépendra de l'hypothèse sur les ressources de départ, du modèle, d'hypothèses de population, de politiques climatiques, de technologie, etc. Les SSP en sont un bon exemple, et là, je vous renvoie à l'article de Bauer et al, 2017 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.006>), dont la figure 1 illustre des hypothèses sur les énergies fossiles. Ensuite, les IAM, sous chacun de ces ensembles d'hypothèses que sont les SSP, tentent d'atteindre le niveau des RCP. Et nous nous retrouvons donc avec de nombreux niveaux d'extractions de ressources fossiles, comme montré dans la figure 6.

3) Les réserves fossiles de Mohr et al. (2016) que vous avez choisies d'employer sont-elles perçues comme un élément sérieux par les climatologues ? L'ASPO et ses adeptes universitaires vous semblent-ils des sources fiables sur ces sujets ?

- Si j'ai utilisé les estimations de Mohr et al 2016, c'est parce qu'il fournissait une base de données cohérente sur la période historique puis 3 scénarios (tous 3 en BAU, mais différencié suivant l'estimation

en ressources). Mais aussi parce qu'il fournissait le détail des extractions de nombreux types de ressources, en particulier les non-conventionnelles, pour le monde entier, jusqu'en 2300. Ainsi, j'avais exactement ce dont j'avais besoin. Pour autant, il faut bien avoir conscience que le modèle qu'il emploie pour faire ces estimations n'est pas dans la veine canonique. Il représente un équilibre offre/demande sans en représenter le prix. C'est une simplification élégante mais risquée. Le modèle est suffisamment bien calibré sur sa période historique, je ne peux être certain que l'extrapolation faite sur l'avenir (sous hypothèses de BAU) soit aussi robuste qu'une estimation qui tiendrait compte de mécanismes plus fins. Ses 3 scénarios sont basés sur 3 estimations de plafonds de ressources fossiles qui sont basés sur la littérature. J'en ai discuté avec un collègue modélisateur dans l'économie de l'environnement, et cette absence de représentation de prix le dérangeait. Au final, ces estimations ne sont pas l'idéal, mais j'ai fait avec aussi bien que je trouvais dans le temps qui m'était imparti...

- Mohr et al, 2016 présente une comparaison de ses émissions à celle des RCP (fig 11). Globalement, son best guess se rapproche de l'estimation pour le RCP4.5.
- Pour être sincère, je connais relativement peu les chiffres de l'ASPO. En revanche, je sais que le scénario de basse extraction de Mohr et al, 2016 est basé sur des estimations de la quantité d'énergies fossiles de Jean Laherrère, et que Steve Mohr et lui ont échangé à ce sujet, comme précisé dans l'article. Jean Laherrère travaillant à l'ASPO, j'imagine donc que leurs estimations sont fiables, et potentiellement dans la fourchette basse de ce qui serait récupérable.

4) Considérez-vous les SSPs les plus volontaristes comme réalistes malgré le lien entre croissance économique et combustion d'énergie fossile ?

- Ce n'est pas une question simple du tout... Je vais devoir détailler un peu là, avec figure 6 de Bauer et al, 2017 dont je parlais précédemment :
- Leurs lignes grises horizontales correspondent à des estimations de ressources, conventionnelles et non conventionnelles. Si je compare aux URR supposés par Mohr, dans sa table 2, il en ressort qu'on est globalement sur un médian, sauf pour le pétrole, où Mohr et al, 2016 est plus haut.
- Les SSP-baseline, autrement dit sans politiques climatiques ou encore BAU, sont dans l'ensemble cohérent avec ces chiffres. Les variations entre SSP sont dues aux différentes hypothèses sur les ressources. Les lignes verticales grisées donnent l'intervalle obtenu par les différents IAM, donc de l'incertitude dans la modélisation de ce qui sera effectivement extrait.
- Quand on cherche à avoir un SSP « plus volontariste », donc si j'interprète bien, plus ambitieux en termes d'atténuation du changement climatique, on se décale vers des cibles de changement climatiques plus basses : RCP4.5 et RCP2.6. Et là, les IAM évaluent des extractions d'énergies fossiles inférieures, en particulier pour le charbon. Moins pour le pétrole, qui reste la ressource de base pour le transport.
- Enfin, est-ce que ces derniers scénarios sont cohérents ? La consommation d'énergie fossile dans les BAU semble cohérente, la diminution observée dans les scénarios les plus ambitieux ne semble pas aberrante, mais à ce point ? En fait, il faut surtout être conscient que le PIB dans les IAM est prescrit. Le système Terre est complexe, mais notre système socio-économique l'est aussi. Ainsi, d'autres modèles ont évalué des PIB pour chacun des SSP. Ainsi, quelque soit l'IAM, quelque soit la cible d'atténuation, le PIB montrera les mêmes évolutions dans un SSP donné. Donc on peut effectivement émettre des réserves. Pour autant, le point crucial de ma réponse, c'est que ce lien observé entre croissance économique et combustion d'énergies fossiles est la conséquence de deux choses : nous avons besoin de plus d'énergie pour croître, et historiquement, ce sont les ressources fossiles qui ont été employées pour fournir notre énergie. Le lien dont vous parlez est donc en partie une conséquence du choix de

notre mix énergétique. Avec un changement de mix, ce lien entre croissance économique et combustion d'énergies fossiles est moins fort.

- Au final, j'estime donc que ces scénarios peuvent être réalistes. Ce qui leur permet de l'être, c'est de continuer à fournir l'énergie pour permettre une croissance, tout en changeant le mix énergétique, abandonnant les énergies fossiles au profit de sources moins émettrices. Sur cette question de mix, je vous renvoie à l'article de Riahi et al, 2017 sur l'énergie dans les SSP.

5) La trajectoire actuelle nous amène à penser que le scénario suivi est le RCP8.5, comment faire entendre l'incertitude pour alimenter en carburant cette dynamique climaticide ?

- Les chiffres que je vais donner dans ce paragraphe sont incertains, attention. Certes, si nous ne faisons rien, nous irions vers $\sim 4.5C$ en 2100 (<https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>). Cependant, j'ai du mal à appeler ça une trajectoire actuelle, car des politiques ont déjà été mis en place, ce qui réduirait à $\sim 3.3C$. Pour moi, c'est ça la trajectoire actuelle, supposer que ces politiques soient maintenues, pas changées dans un sens ou dans l'autre. Si on atténue davantage avec les intentions déclarées par les Etats membres de l'Accord de Paris, on descend à $\sim 2.8C$.
- En comparant aux augmentations de température dans les différents RCP (figure 12.5, Chapitre 12, AR5 1^{er} groupe de travail, p1054), en sachant qu'on s'intéresse à l'augmentation à 2100 avec le préindustriel pour référence (1850-1900) et non pas 1986-2005 comme dans cette figure, si on maintient la politique actuelle, nous allons plutôt entre le RCP6.0 et le RCP8.5, mais plus proche du premier.
- Si je reviens enfin à la question : nous ne sommes effectivement pas certains que nous aurions suffisamment d'énergies fossiles pour atteindre un changement climatique aussi élevé que dans le RCP8.5. Et nous ne pouvons être certains non plus sur les différents changements dans nos sociétés, comportements, politiques publiques, etc, qui se produiront sur le 21^e siècle. Donc comment faire entendre cette incertitude... voulez-vous dire communiquer dessus ? A vrai dire, le problème n'est pas « on n'est pas certain de pouvoir émettre assez pour en arriver à ce niveau de changement climatique » mais plutôt « on est pas certain de pouvoir émettre suffisamment peu pour ne pas dépasser cet autre niveau, car au-delà, les pertes vont devenir de plus en plus importantes ».

7) Dans un article paru l'an dernier, vous écrivez : "*We show that virtually all of the total uncertainty is attributable to the uncertainty in the future Earth system's response to the anthropogenic perturbation. We conclude that the uncertainty in emission estimates can be neglected for global temperature projections in the face of the large uncertainty in the Earth system response to the forcing of emissions.*" Considérez-vous dès lors qu'il est anecdotique de traiter de la question des énergies fossiles au sujet du réchauffement climatique ? Comment le principal carburant actuel de l'effet de serre peut être considéré marginal pour la dynamique climatique du siècle ?

- Attention, j'ai écrit que c'est l'incertitude sur les émissions qui peut être négligée, et je n'ai pas du tout écrit que les émissions elles-mêmes pouvaient être négligées ! L'idée de ce papier était de se dire que les émissions sont incertaines, le système Terre l'est aussi, si je combine les deux, quelle incertitude domine ? Et ce qui en ressort et que j'écris dans cette phrase, c'est qu'une fois ces deux sources d'incertitudes prises en compte, l'incertitude totale est dominée par celle sur la modélisation du

système Terre. Autrement dit, rajouter ou non l'incertitude sur les émissions ne changent rien. Et en aucun cas, ça signifie qu'on peut négliger les émissions elles-mêmes !

- Donc non, je considère que les énergies fossiles ne sont pas du tout anecdotiques vis-à-vis du réchauffement climatique, et je suis convaincu que c'est bien leur consommation qui est responsable en bonne partie du changement climatique observé et à venir. Mais l'incertitude sur le calcul des émissions, cette incertitude uniquement, elle, n'accroît pas l'incertitude totale si on tient compte de l'incertitude de modélisation du système Terre.
- Pour éviter d'autres erreurs d'interprétation, quand je parle d'incertitude sur le calcul des émissions, c'est à trajectoire d'extraction de ressources fossiles fixée. Si on extrait puis consomme moins d'énergies fossiles, ce n'est tout simplement plus la même trajectoire, et ce n'est pas cette source d'incertitude que j'avais étudiée dans ce papier.

8) Dans votre thèse, vos projections indiquent un réchauffement entre 2 et 2,5°C selon les scénarii de Mohr (je ne compte que le *low* ou le *medium*, puisque le *high* n'est pas envisagé par l'agence internationale de l'énergie), des paramètres - fonte du pergélisol, usages des sols... - peuvent-ils empirer ces trajectoires ?

- Pour commencer, dans cet article, ou dans ma thèse, les projections de température sont par rapport à 1986-2005. Il faut rajouter 0.61C pour les avoir par rapport à 1850-1900, souvent pris comme période de référence pour le préindustriel. Dans le cas du Best Guess, j'obtenais 2.8C en 2100 par rapport à 1850-1900. Pour comparaison, le RCP6.0 est à environ 2.9C en 2100 par rapport à 1850-1900. Donc c'est de l'ordre de ce qu'on atteindrait avec les politiques actuelles.
- Concernant l'usage des sols, les hypothèses faites dans ces scénarios étaient l'utilisation des terres associée aux RCP jusqu'en 2100, et sur 2100-2300, n'ayant plus de données, les émissions dues à l'utilisation des terres chutaient. Cette hypothèse n'est pas vraisemblable, des transitions dans l'usage des terres continueraient à causer des émissions, mais c'était faute de mieux. Mais donc, ça ne changerait rien vis-à-vis de 2100.
- La fonte du permafrost libérerait effectivement davantage d'émissions, aggravant le changement climatique, mais l'effet serait limité dans cette gamme de température. Pour information, le modèle que nous employons, OSCAR, modélise désormais la fonte du permafrost.
- Je ne vois pas d'autres éléments du système Terre qui augmenterait significativement l'élévation de température, à supposer qu'on reste sur cette trajectoire d'extraction/consommation. Les perturbations des émissions naturelles (biomass burning et wetlands) sont prises en compte, le permafrost est la principale manquante.
- Les éléments qui empireraient ces trajectoires me semblent plus liées à la fonte de la banquise arctique, permettant un meilleur accès à des ressources, dont des fossiles, avec les hydrates de méthane. Leur exploitation relancerait le changement climatique. En fait, tout dépend de l'horizon auquel on regarde. Certes, il y a un pic dans les ressources conventionnelles, qui limite machinalement notre changement climatique. Mais l'utilisation de ressources non-conventionnelles relance ces émissions. Cependant, leur exploitation tend à être plus risquée, environnementalement et financièrement parlant, comme les gaz de schiste par exemple. Je suis incapable de dire ce qui sera effectivement utilisé, ça dépend de beaucoup trop de facteurs, et extrapoler les tendances actuelles est un pari certes inquiétant, mais peu sûr.

9) Si vous avez un élément à rajouter à ce sujet, n'hésitez pas !

- Je ne rajoute pas cet élément, mais j'insiste à nouveau dessus : mon article était une comparaison de sources d'incertitudes. Quand on rassemble sur une projection climatique l'incertitude de modélisation du système Terre et l'incertitude sur les émissions fossil-fuels, l'incertitude sur la 2^e devient négligeable face à la 1^{ère}. Mais on ne peut négliger les émissions fossil-fuels au total. On a besoin de leur moyenne ou médiane. Si elles étaient à 0, la reconstruction historique du climat ne marcherait plus, tout simplement.