



Victor Court est actuellement attaché temporaire d'enseignement et de recherche en économie à l'[Université de Paris Nanterre](#) en France. Il vient de terminer dans cette même université un doctorat en économie sur le rôle de l'énergie dans la croissance économique de long terme. Le programme de recherche actuel de Victor est d'inclure le rôle de l'énergie au sein de la récente [Théorie de la Croissance Unifiée](#). Victor est titulaire d'un master en économie de l'énergie, de l'environnement et du développement durable de l'[Institut Français du Pétrole et des Energies Nouvelles](#) et d'un diplôme d'ingénieur en agronomie et sciences de l'environnement d'[AgroParisTech](#), la première école d'ingénieur française en sciences de l'environnement et en sciences de la vie. Il est co-auteur de plusieurs articles scientifiques dans des revues à comité de lecture, portant notamment sur le lien entre la dynamique des [Taux de Retours Énergétiques](#) (TRE) des systèmes énergétiques et la croissance économique.

Pouvez-vous nous dire ce qu'est la transition énergétique et pourquoi elle est un sujet de très grande importance pour l'économie ?

Une transition énergétique est une modification profonde des modalités d'approvisionnement et de consommation de l'énergie d'une économie. Depuis quelques années, cette notion est essentiellement utilisée pour désigner une baisse de l'approvisionnement en combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon), et potentiellement aussi en électricité nucléaire (qui est non renouvelable mais absolument pas fossile), avec en compensation une augmentation de l'utilisation des énergies dites renouvelables (hydroélectricité, éolien, solaire photovoltaïque, agrocarburants, géothermie, etc.). Cette nécessaire transition énergétique des pays développés, et également de ceux en cours de développement, est issue des inquiétudes légitimes de la communauté internationale concernant le changement climatique induit par les émissions de gaz à effet de serres issues de l'utilisation des énergies fossiles. Dans une autre mesure, non moins importante à mon sens, la transition des fossiles vers les renouvelables est également une nécessité compte tenu du caractère fini des ressources énergétiques non renouvelables dont la production doit par définition passer à un moment ou à un autre par un maximum avant de décroître.

L'enjeu de la transition énergétique est absolument considérable compte tenu du lien très fort, mais mal connu, qui lie énergie et économie. Pour faire simple, ce qui constitue le niveau de vie des habitants de n'importe quelle société réside dans la quantité et la qualité des services qu'ils peuvent tirer des différentes infrastructures et objets à leur disposition, or ces derniers ne sont rien d'autre que des ressources naturelles transformées en produits finis d'une durée de vie plus ou moins longue. Les bâtiments qui nous abritent du froid et des intempéries pour travailler, nous reposer et nous divertir sont des ressources naturelles transformées, tous les objets que nous utilisons au quotidien le sont également, tout comme l'ensemble des moyens de transports qui déplacent ces objets et leurs utilisateurs. Pour transformer des ressources naturelles en biens durables ou consommables et utiliser ces derniers, il faut de l'énergie car par définition cette dernière est la

marque du changement, mais l'énergie ne peut absolument pas être créée par l'homme et doit elle aussi être puisée dans l'environnement. En termes d'ordre de grandeur, pour transformer toutes les ressources naturelles en produits finis sur lesquels reposent une économie moderne, les muscles des hommes et des femmes valent 1 quand l'énergie extraite de l'environnement (dans une forme autre que la nourriture qui active les muscles !) vaut 200.

La conclusion est alors simple : l'énergie est ce qui pilote l'activité économique au premier ordre, et ce avant le travail et le capital contrairement à ce que peuvent penser la plupart des économistes et autres experts du sujet. Donc la façon dont nos sociétés s'approvisionnent et utilisent l'énergie contenu dans l'environnement est absolument primordiale pour comprendre leurs fonctionnements.

À travers l'Histoire, pouvez-vous nous dire quels ont été les enjeux socio-économiques des transitions énergétiques ?

Si on s'en tient à la définition très large que j'ai donné plus haut, on peut distinguer quatre grandes transitions énergétiques dans l'histoire de l'humanité en plus de celle en cours ou plutôt à venir. La première est celle qui a vu la découverte de la maîtrise du feu, daté d'au moins 125 000 ans avant notre ère pour notre espèce *Homo Sapiens* (certaines recherches font état d'une maîtrise du feu par le genre *Homo Erectus* remontant à 0,2 voire 1,7 million d'années). L'énergie libérée par la combustion du bois, ou d'autres formes de biomasse, a permis à nos ancêtres de cuire les aliments issus de la chasse et de la cueillette. Ce faisant, ils ont élargi leur régime alimentaire tout en améliorant la digestibilité de leur nourriture, ce qui a surement contribué au meilleur développement de leurs cerveaux. La maîtrise du feu a aussi impliqué une meilleure protection contre le froid et les prédateurs, une augmentation de l'activité la nuit grâce à l'éclairage, et même le développement des arts rupestres qui poussent encore aujourd'hui à notre admiration.

La deuxième transition énergétique de l'histoire de l'homme a été non moins importante puisqu'elle a consisté à domestiquer certaines plantes et certains animaux au travers de l'essor de l'agriculture et de l'élevage, une période appelée révolution néolithique et daté d'environ 10 000 ans. Ces nouvelles formes de capture de l'énergie ont engendré une affirmation de la sédentarité (déjà présente chez certaines tribus de chasseurs-cueilleurs), accompagnée des premières formes de division du travail et de hiérarchie politique. Outre l'utilité de leurs puissances dans le travail des champs, les animaux d'élevage ont aussi été la source de nouveaux produits (lait, cuirs, matériaux en boyaux) et de nouvelles pratiques (transport, combat). Les perfectionnements de l'agriculture par la fertilisation et l'irrigation ont permis une augmentation progressive de la densité des villes tandis que l'intensification des échanges commerciaux et guerriers entre ces dernières ont ensuite ouvert la voie à l'établissement des premiers empires.

Une troisième transition énergétique réalisée par certaines sociétés a consisté à exploiter l'énergie des vents et des courants d'eau pour actionner des bateaux à voile et des moulins. Là encore, ces nouveaux moyen de capture de l'énergie ont générés des changements profonds au niveau de l'organisation des villes et des villages, par l'apparition de nouveaux métiers tout d'abord, mais aussi par l'évolution nécessaire des institutions utiles au financement et à la gestion de ces

nouvelles infrastructures. Le transport par bateau a donné lieu aux premières phases de la mondialisation et *in fine* à la découverte des Amériques dont les répercussions historiques ont été extrêmement importantes.

Enfin, l'homme a réalisé une quatrième transition énergétique d'envergure au cours de la Révolution Industrielle il y a à peu près 200 ans. Contrairement aux trois premières transitions énergétiques qui ont toutes consisté à exploiter une part croissante de l'énergie renouvelable provenant du rayonnement incident du soleil (sous des formes variées allant des produits de la photosynthèse et à ceux de la circulation atmosphérique ou du cycle de l'eau), cette quatrième transition a consisté à puiser de l'énergie dans des stocks non renouvelables de matière organique (donc d'énergie solaire) fossilisée, dit aussi minéralisée. Certains iront jusqu'à dire que par son changement de substrat, renouvelable vers non renouvelable, cette quatrième transition énergétique de l'histoire de l'homme n'était en fait que la première, les trois précédentes ne constituant que des phases successives d'un seul et même régime préindustriel. Je maintiens pour ma part que compte tenu des modifications profondes des modes de production et de consommation de l'énergie précédemment décrit, et de leurs répercussions sur l'ensemble de l'économie, l'histoire de l'homme compte bien trois transitions énergétiques majeures avant l'avènement de l'utilisation massive des énergies fossiles au cours du dix-neuvième siècle constituant une quatrième transition énergétique.

Quoi qu'il en soit les bouleversements générés par l'utilisation des énergies fossiles ont été absolument considérables sur les deux cents dernières années. La transformation de l'énergie thermique issue de la combustion du charbon en puissance motrice par la machine à vapeur a proprement révolutionnée les secteurs miniers et industriels, mais également ceux du textile en autorisant la mécanisation des usines. Dans un second temps c'est le secteur du transport aussi bien par bateau que par train qui a été bouleversé par l'introduction de la machine à vapeur. Plus tard, la complémentarité du moteur à combustion interne et du pétrole, puis de l'électricité et des technologies informatiques ont engendrés des bouleversements de société non moins importants. Tous ces éléments se sont conjugués pour changer drastiquement la structure des métiers et des loisirs, les méthodes de production, les besoins de compétence et donc d'éducation, la possibilité d'établir un système de santé opérant, l'organisation des territoires (aussi bien des villes que des milieux ruraux), les échanges internationaux, et toutes les institutions régissant la bonne marche et l'interconnexion de ces éléments.

En résumé, le passage progressif d'une économie « organique » à une économie « inorganique » est indéniablement allé de pair avec, et je dirais même a autorisé, l'accès à ce que nous considérons être la modernité. Aujourd'hui, nous sommes à l'aube d'une cinquième transition énergétique qui vise à réduire notre dépendance aux énergies non renouvelables (fossile et pour certain nucléaire également) pour les remplacer par des moyens modernes de captage du flux solaire renouvelable sous formes d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques notamment. Cette nouvelle transition est singulière dans le sens où, à l'inverse des quatre autres l'ayant précédée, elle ne pourra vraisemblablement pas se faire par empilement des moyens de production d'énergie (quand les moulins à vents ont été inventés, l'utilisation des animaux de trait et du bois de chauffe n'a pas diminué dans l'absolu, c'est seulement leurs parts relatives qui ont baissé), puisque les énergies

fossiles devront totalement laisser place à des moyens de production d'énergie bas-carbone et renouvelable. Par ailleurs, si dans le passé les quatre transitions énergétiques de l'histoire de l'homme se sont vues accompagnées d'une croissance de la quantité d'énergie par personne, notamment dans les pays d'Europe et leurs colonies, tout porte à croire que cela ne pourra pas se faire aussi facilement lors de cette cinquième transition énergétique.

On voit donc que les transitions énergétiques sont des éléments clefs pour comprendre les évolutions des sociétés humaines. Aujourd'hui la grande majorité des décideurs politiques pensent que la question de la transition énergétique peut être traitée de manière secondaire et que le chômage, les retraites, la santé, l'éducation lui sont prioritaires. Il n'y a à mon sens rien de plus faux, la question énergétique doit être la priorité absolue de toute réflexion économique et politique car elle a toujours été l'élément le plus structurant des sociétés.

Qu'est-ce que le Taux de Retour Énergétique et en quoi cet indicateur est-il pertinent ?

Le Taux de Retour Énergétique (TRE), ou Energy-Return-On-Investment (EROI) en anglais, est un indicateur qui mesure la difficulté à extraire l'énergie de l'environnement. En effet, comme je l'ai déjà dit, nous ne savons pas « produire » l'énergie et nous sommes seulement capables de l'extraire de l'environnement, de la transformer et de la transporter. Chacune de ces opérations consomme à son tour de l'énergie si bien que la formule clé de la « production » humaine d'énergie est le ratio entre l'énergie réellement disponible et l'énergie consommée pour la capter, la transformer et la transporter. En d'autres termes, le TRE est le ratio entre l'énergie qui est disponible à la société (pour faire autre chose qu'extraire de l'énergie) et l'énergie consommé pour construire et utiliser les infrastructures (mines, puits de forage, pipelines, raffineries, centrales électriques, éoliennes et panneaux photovoltaïques, etc.) qui permettent l'extraction, la transformation et le transport de l'énergie.

Faisons une analogie avec le monde du vivant pour comprendre l'importance du TRE. Pour survivre chaque être vivant a besoin de se procurer au moins autant d'énergie qu'il n'en consomme. Par exemple, pour l'entretien et la réparation de son organisme, mais également la reproduction et la protection de sa progéniture, un prédateur a besoin d'obtenir d'une proie qu'il consomme beaucoup plus de calories qu'il n'en a dépensé pour la chasser. Il en va donc de même pour une société humaine, plus son TRE est élevé plus l'énergie de l'environnement est accessible et peut donc être facilement extraite pour supporter un nombre croissants d'activités concourant au bien-être des individus. Par exemple, imaginons que le TRE du système énergétique pétrolier soit de 20. Cela veut dire que pour 1 unité d'énergie consommée pour construire les puits de forage, les pipelines, les tankers, et les raffineries, l'ensemble de ce système génère 20 unités d'énergie disponible pour la société. Logiquement, seules 19 de ces 20 unités d'énergies sont disponibles pour faire autre chose qu'extraire de l'énergie et ainsi activer toutes les autres infrastructures, machines et produits de l'économie, c'est-à-dire supporter la production de nourriture et de bien

manufacturés, le transport de ces biens et des personnes, le système éducatif et de santé, le développement culturel, les moyens de maintien de l'ordre interne et de défense externe, etc.

Il faut rajouter à cela une vision dynamique très importante car le TRE d'un système énergétique est un indicateur de la lutte qui s'opère à tout moment entre le progrès technique et l'épuisement physique. Lorsque l'on commence à exploiter une ressource énergétique (du pétrole ou le flux de vent terrestre par exemple) on commence généralement par la partie de la ressource la plus facilement accessible, si bien que dans un premier temps les gains du progrès technique tendent à faire augmenter le TRE. Mais au bout d'un moment, la production se tourne nécessairement vers des gisements de moins bonne qualité, à tel point que c'est cet effet d'épuisement de la ressource qui prend le dessus et entraîne alors une baisse du TRE.

Quelles sont les principaux enseignements qui peuvent être tirés des estimations de TRE, et de vos travaux de recherche en particulier ?

Malgré des débats toujours en cours sur la méthodologie de calcul des TRE, on peut dégager certaines tendances du grand nombre d'études qui ont été menées pour estimer le TRE de différents systèmes énergétiques. Tout d'abord, il apparaît que (i) les systèmes énergétiques préindustriels, basés sur la conversion de l'énergie solaire en nourriture et en bois de chauffe, ont des TRE autour de 10-20 ; (ii) les énergies fossiles conventionnelles (charbon, pétrole, gaz) ont des TRE bien plus élevés autour de 40-80 ; (iii) les fossiles non conventionnels (sables bitumineux, pétrole lourds, pétrole et gaz de roche mère, etc.) et les renouvelables modernes vers lesquels une transition complète est envisagée ont pour l'instant des TRE plus faibles, autour de 5-20. Pour les renouvelables, c'est surtout le caractère intermittent de ces énergies diffuses, et donc la nécessité de disposer d'installations électriques de réserve et de procéder à un renforcement des réseaux électriques, qui empêchent ces moyens de productions d'avoir des TRE élevés aujourd'hui. Par ailleurs, certaines études montrent aussi que les TRE des combustibles fossiles conventionnels (charbon, pétrole, gaz) semblent diminuer depuis plusieurs décennies. Avec mon collègue Florian Fizaine nous avons confirmé cette intuition pour le pétrole et le gaz au niveau mondial, en montrant que les TRE maximums de ces deux ressources ont été atteints au cours du vingtième siècle. Nous avons par contre montré que le TRE maximum du charbon n'avait pas encore été atteint, mais qu'il devrait l'être d'ici quelques décennies. Dans une autre étude, nous avons aussi formellement démontré une autre intuition jusque-là communément admise sans preuve, à savoir qu'un TRE agrégé de moins de 11 est incompatible avec un taux de croissance économique positif, si bien qu'il faut sûrement compter sur un TRE agrégé de 15-20 pour observer une croissance économique positive et soutenue.

Plusieurs conséquences peuvent être tirées de ces résultats. On peut tout d'abord légitimement penser que le passage de la biomasse (énergétiquement peu dense) à faible TRE, aux énergies fossiles (énergétiquement très denses) à TRE élevés, a été un élément clef pour rendre possible un régime élevé de croissance économique déclenché par l'industrialisation. On peut ensuite tout aussi

légitimement se dire qu'avoir un système énergétique possédant un TRE élevé est encore aujourd'hui un pré-requis (probablement pas suffisant) pour soutenir un régime de croissance économique élevée. Par-là, on en déduit que le maintien d'une prospérité matérielle élevée (pour ne pas dire croissante !) sera difficilement conciliable avec un système énergétique principalement fossile qui a assurément toutes les chances de voir son TRE agrégé décroître progressivement au cours du temps compte tenu du caractère inéluctable de l'effet d'épuisement. De ce seul fait qui s'additionne à celui du changement climatique, la transition énergétique vers les renouvelables est donc indispensable au maintien à long terme d'un certain niveau de confort matériel, si tant est que les TRE de ces technologies augmentent suffisamment au cours de leurs déploiements à grande échelle.

En se basant sur le concept de TRE, quels sont les choix politiques qui encourageraient mieux la transition énergétique ?

Le TRE est un indicateur parmi d'autres pour orienter les choix de trajectoires technologiques du secteur énergétique. Compte tenu des difficultés qui entourent les estimations de TRE, il ne doit pas être vu comme une variable de choix inconditionnel, et il serait tout à fait erroné voire néfaste de vouloir absolument maximiser le TRE agrégé du système énergétique et de définir l'approvisionnement énergétique d'un pays sur cette base. En revanche, recourir au TRE peut permettre à mon sens d'éviter certains écueils. Les agrocarburants de première génération sont symboliques d'un choix de technologie énergétique qui n'aurait jamais dû arriver au stade de l'industrialisation à grande échelle si des calculs sérieux de TRE avait été fait assez tôt. Les agrocarburants de première génération consistent à transformer des denrées alimentaires (maïs, blé, colza, etc.) en éthanol ou en esters d'huiles végétales qui sont ensuite ajoutés respectivement à l'essence et au diesel afin de diminuer les émissions de CO₂ de ces carburants et de diminuer la dépendance des transports au pétrole. Or, de nombreuses études ont montrés que non seulement le bilan de gaz à effet de serre n'était absolument pas diminué par ces pratiques (à cause notamment du phénomène induit de changement indirects d'affectations des sols), mais que par ailleurs le TRE de ces systèmes de production d'énergie était tout juste supérieur à 1, voire inférieur à cette valeur seuil en dessous de laquelle les filières d'agrocarburants sont alors consommatrices nettes d'énergie ! Il est aussi admis aujourd'hui que la production d'agrocarburants des pays développés a exacerbé la volatilité des prix des matières agricoles et a donc augmenté l'instabilité de ces marchés pourtant primordiaux pour l'ensemble de la population mondiale, et pour les pays en développement en particulier. Un minimum de rationalité s'appuyant sur le concept de TRE permettrait d'éviter cette triple aberration (en termes de CO₂, d'énergie, et d'instabilité des marchés agricoles) qui consiste à brûler des denrées comestibles dans les moteurs des voitures des pays développés.

Un deuxième type de technologie pour lequel le TRE permet à mon sens d'orienter le débat de la transition énergétique est le nucléaire. Le TRE du nucléaire semble assez élevé (une étude a avancé une valeur de 75, mais d'autres études ont mis en doute cette estimation) et dans un contexte où la

priorité est à mon sens la diminution drastique des émissions de gaz à effets de serre, se priver dans le même temps du nucléaire me paraît être une option peu judicieuse. Bien sûr la gestion des déchets nucléaires est extrêmement problématique, mais l'impact du changement climatique est à mon avis bien plus pernicieux tout en souffrant d'un manque de tangibilité réel pour le citoyen consommateur et votant. Le nucléaire fait peur pour des raisons qui tiennent plus à l'imaginaire collectif et au manque de connaissance scientifiques, mais objectivement sa place dans l'approvisionnement énergétique est moins dangereuse que celle des énergies fossiles.

De manière plus générale, les réflexions que je porte sur les TRE des systèmes énergétiques et leurs implications me portent à croire qu'il y a un manque criant d'anticipation des changements profonds d'organisation induits par la transition énergétique à venir. Les infrastructures aussi bien énergétiques que non énergétiques qui sont construites aujourd'hui ont des durées de vie très longues qui génèrent des phénomènes de verrouillages technologiques. Il est par exemple anormal que l'organisation des villes et de manière plus large du territoire continue de se faire sur les mêmes schémas que ceux des périodes florissantes du vingtième siècle basé sur une énergie fossile abondante et peu cher. Les politiques publiques doivent beaucoup mieux intégrer que le monde de demain, basé sur l'énergie renouvelable ou non, devra être beaucoup plus « restreint » pour chaque citoyen. La consommation matérielle effrénée est incompatible avec notre avenir énergétique, qu'il soit renouvelable ou non, et ne pas anticiper cet état de fait ne rendra sa concrétisation que plus douloureuse.