

Mémoire de recherche :

**LES LIENS ENTRE LE DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE ET
L'ÉVOLUTION DÉMOGRAPHIQUE EN FRANCE : UNE PERSPECTIVE
CLIOMÉTRIQUE 1827-2017**

Par Hugo Duterne

Mémoire dirigé par Mme Magali Jaoul-Grammare, Chargée de recherche CNRS

Remerciements :

Je souhaiterais remercier pour ce travail, Mme Jaoul-Grammare qui a été très à l'écoute de mes idées et projets. Je souhaiterais la remercier pour sa disponibilité et sa grande patience. Ses explications toujours claires m'ont permis d'aller au bout de ce travail de longue haleine. Avec son aide j'espère pouvoir terminer en thèse ce qui a été commencé ici.

Je souhaite également remercier M. Diebolt pour ses encouragements et ses conseils qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

Mes camarades du Master 2 Macroéconomie et Politiques Européennes ainsi que l'équipe enseignante ont aussi une place toute particulière dans mon esprit.

Merci à Manon pour l'aide et le soutien qu'elle m'a apportés. Puisse cela se poursuivre pour longtemps encore !

Introduction

La démographie est une préoccupation sociale depuis des temps immémoriaux. On en trouve des occurrences dans un des plus vieux documents écrits, la Bible :

Genèse 1 :28 « *Dieu les bénit, et Dieu leur dit: Soyez féconds, multipliez, remplissez la terre, et l'assujettissez; et dominez sur les poissons de la mer, sur les oiseaux du ciel, et sur tout animal qui se meut sur la terre. »*

Genèse 9 :1 « *Dieu bénit Noé et ses fils, et leur dit: Soyez féconds, multipliez, et remplissez la terre. »*

Genèse 9 :7 « *Et vous, soyez féconds et multipliez, répandez-vous sur la terre et multipliez sur elle. »*

Les peuples antiques avaient également souci de mieux comprendre et influencer la démographie pour des raisons militaires, comme la politique nataliste de l'Empire Romain, ou pour renforcer la stabilité de l'Etat, comme les écrits « malthusiens » de Platon et Aristote (Doliger 2006). L'histoire compte de nombreux témoignage de penseurs ou de décideurs qui se sont penchés sur les dynamiques de population, de Saint Thomas d'Aquin au XIIe siècle jusqu'aux Physiocrates du XVIIIe, en passant par les écrits de Machiavel et Jean Bodin au XV et XVIe siècle.

De nos jours, les enjeux démographiques se trouvent à la croisée d'un grand nombre de préoccupations. On peut les retrouver évoqués lors des grandes crises migratoires, des débats sociétaux comme celui du débat sur les retraites, mais ils gravitent surtout autour de l'écologie et de ses défis. On a par exemple vu récemment certains intellectuels appeler à un contrôle drastique des naissances et à la mise en place de permis de procréer (Antoine Bueno, *Permis de procréer, Nous serons 11 milliards en 2100 ! Comment sauver la planète*), chaque humain étant vu comme l'émetteur d'une dose inévitable et incompressible de pollution.

Certains économistes également mettent en avant le ralentissement démographique pour expliquer le ralentissement économique de pays comme le Japon, entré en déflation depuis les années 1990, phénomène qui préfigurerait également le destin de l'Europe (Hideki Konishi et Kozo Ueda 2013 ; Derek Anderson, Dennis Botman et Ben Hunt 2014 ; Patrick Imam 2014).

La démographie enfin est vu, à tort ou à raison, comme un instrument de pouvoir, une population en augmentation étant synonyme de dynamisme. Ce dynamisme est parfois présenté comme la démonstration de la réussite d'un modèle (celui de la France et de son système social face à l'Allemagne), et parfois comme un danger, en particulier lorsqu'il s'agit de pays du sud :

"Ce problème il est quoi ? Il est démographique. J'ai été un des premiers, je me suis fait attaquer partout, surtout en Europe, quand j'ai dit ça. [...] Quand vous êtes un pays pauvre, où vous laissez la démographie galopante, où vous avez 7, 8 enfants par femme, vous ne sortez jamais de la pauvreté. Même quand vous avez un taux de croissance de 5 à 6 % vous n'arrivez jamais à en sortir."

Interview du président de la République Française, Emmanuel Macron, lors d'une visite officielle au Nigéria, le 4 juillet 2018.

Pour paraphraser le démographe français Dominique Taburin, la démographie s'avère être la plus dure des sciences molles que sont les sciences sociales. Si l'on ne peut ignorer sa capacité à anticiper les évolutions de population avec un relatif succès, du moins à moyen terme, il n'en reste pas moins qu'un certain nombre de questions restent à ce jour non éclaircies. Si l'on parvient donc à dire comment évoluent les populations humaines, on ne sait pas encore pourquoi elles empruntent tel ou tel schéma de développement. Par exemple, la transition démographique qui a eu lieu dans les pays occidentaux au XIX^{ème} siècle s'est traduite tantôt par une baisse de la mortalité suivie d'une baisse de la natalité et tantôt l'inverse (notamment aux Etats-Unis et en France).

Il est en particulier difficile d'expliquer les séquences de croissance de la population. Pourquoi la démographie française a stagné au XIX^{ème} siècle tandis que celle de l'Allemagne se trouvait en pleine croissance ? L'explication économique à cela est l'existence d'un décalage dans les épisodes d'industrialisation de ces deux pays, mais encore une fois cette explication n'est qu'un pis-aller. Si l'augmentation de la richesse était la réponse, ne verrait-

on pas la fertilité allemande ou japonaise, deux pays connus pour leur efficacité économique, être d'un niveau comparable ou supérieur à celui de la France ? Force est de constater que tel n'est pas le cas aujourd'hui.

L'évolution des populations est aussi plus complexe et tortueuse que le modèle linéaire de transition démographique, calqué en un sens sur le modèle de Rostow, ne le laisse entendre. En effet, le phénomène d'explosion démographique, lié à une baisse de la mortalité et par une baisse plus tardive de la natalité, n'est pas un phénomène unique dans l'histoire. De même le ralentissement démographique qui a lieu dans certains pays avancés ne constitue pas nécessairement l'aboutissement final du développement économique et du progrès technique.

Si les approches passées se sont révélées décevantes tant en termes de pouvoir explicatifs que de pouvoir prédictifs c'est sans doute qu'elles ont négligé – ou plutôt mésinterprété – un élément essentiel : l'état des ressources ou plus précisément l'état des sources énergétiques sur lesquelles reposent les sociétés humaines, hier la biomasse aujourd'hui les énergies fossiles. Le terme mésinterprété est sans doute celui qui convient puisque depuis Malthus à la fin du XVIII^e siècle, on considère instinctivement que la hausse ou la baisse de la consommation d'énergie s'explique par hausse ou une baisse de la population.

Pourtant le sens de la causalité n'est peut-être pas si clairement établi. Pour affirmer cela on peut s'appuyer sur un domaine annexe mais non dépourvu de lien avec la question qui nous préoccupe : celui du sens de la causalité entre évolution du PIB et évolution de la consommation d'énergie. En effet, différents travaux d'économistes ont réussi à démontrer que c'est la hausse ou la baisse de l'offre en énergie qui explique ensuite la variation du PIB. On peut notamment penser aux travaux de Douglas Reynolds (Douglas Reynolds et Marek Kolodziej 2006), qui ont montré que c'était la stagnation de la production de pétrole qui avait causé, au sens de Granger, le ralentissement puis l'effondrement économique de l'Union Soviétique à partir des années 1980, et non l'inverse. Au niveau mondial, le lien de causalité est également confirmé (Ayres 2002 et 2013). Plus récemment les travaux de Gaël Giraud (Giraud et Zeynep 2014) portant sur un groupe de 33 pays ont montré que l'énergie causait au sens de Granger la majorité de la croissance économique (de l'ordre de 60%) tandis que le reste était expliqué par les deux facteurs traditionnellement mis en avant que sont le travail et le capital.

Si cette logique s'applique au PIB, il serait intéressant de tester s'il en va de même pour le lien entre énergie et démographie. En d'autres termes, nous cherchons à savoir si c'est l'augmentation de l'offre d'énergie qui entraîne une hausse de la démographie ou l'inverse.

L'objet de ce mémoire de recherche s'intéresse au cas français entre 1827 et 2017. Après avoir fait une revue de la littérature économique pertinente, nous nous attacherons à présenter nos données puis les résultats des tests de causalité que nous avons menés. Nous discuterons par la suite des résultats de ces tests et nous proposerons une interprétation. Nous investiguerons enfin les pistes de recherche qu'ouvre l'analyse de ces premiers résultats et présenterons le projet de thèse.

Pour cela nous adopterons la démarche cliométrique qui vise à comprendre les phénomènes historiques en utilisant les méthodes de l'économétrie et la théorie économique. En effet, nous pensons la démarche cliométrique fortement adaptée à notre étude, puisque nous cherchons à rétablir un lien entre économie et histoire afin d'expliquer au mieux l'évolution démographique de la France malgré son comportement a priori chaotique et surprenant. De plus, la cliométrie, puisqu'elle constitue une démarche de recherche d'histoire quantitative fondée sur la théorie économique, informée par la production de données nouvelles et l'utilisation d'outils quantitatifs modernes (Diebolt, 2001), conduit parfois en améliorant la compréhension du passé à « tuer » certains mythes. Douglass North, un des fondateurs de cette approche scientifique considérait ainsi que la théorie économique la plus élémentaire peut être utile pour contester les interprétations du passé les plus vénérables. Nous pensons que ce mémoire aura contribué modestement à renforcer cette réputation de la méthode cliométrique.

I. Revue de littérature :

Les questions démographiques et en particulier la compréhension du phénomène de « transition démographique » qui s'est produit dans de nombreux pays, ont fait très tôt partie des axes de recherche de la science économique. Cette dernière est traversée au cours de son histoire par différentes « écoles de pensée » qui tendent à faire de la croissance démographique soit une conséquence soit une cause (positive ou négative) de la croissance économique.

1. À l'origine de la science économique : une vision négative du lien entre croissance de la population et développement économique

En 1798, l'économiste et prêtre anglican Thomas Malthus publie son Essai sur le principe de population où il cherche à démontrer que la population croît selon une loi géométrique tandis que la production ne croîtrait que selon une progression arithmétique :

La population lorsqu'elle est non contrôlée augmente selon une progression géométrique. Les subsistances quant à elles augmentent selon une progression arithmétique. Même avec une connaissance sommaire des mathématiques, il est aisé de reconnaître le potentiel de croissance bien plus élevé de la première sur la seconde. (Malthus 1798, p.14, traduction de l'auteur)

Une loi géométrique pose que tout niveau de population N à l'instant t équivaut à multiplier la population d'origine N_0 par le taux de croissance de la population $n+1$ exposant t :

$$N_t = N_0(n+1)^t$$

Une loi arithmétique pose quant à elle que le niveau de ressources R au moment t peut être retrouvé en additionnant aux ressources initiales R_0 le montant de ressources supplémentaires à chaque nouvelle période « r » que multiplie le nombre de périodes considérées « t » :

$$R_t = R_0 + (r \cdot t)$$

Illustrons cela par un exemple numérique : Supposons que la population de départ est de 1000 individus et le niveau de ressource est de 10 000 ; que la population augmente de 2% par an tandis que les ressources disponibles s'accroissent de 100 unités par an. On suppose aussi qu'un individu a besoin pour vivre d'une unité de ressource par an.

On obtient alors le graphique suivant :

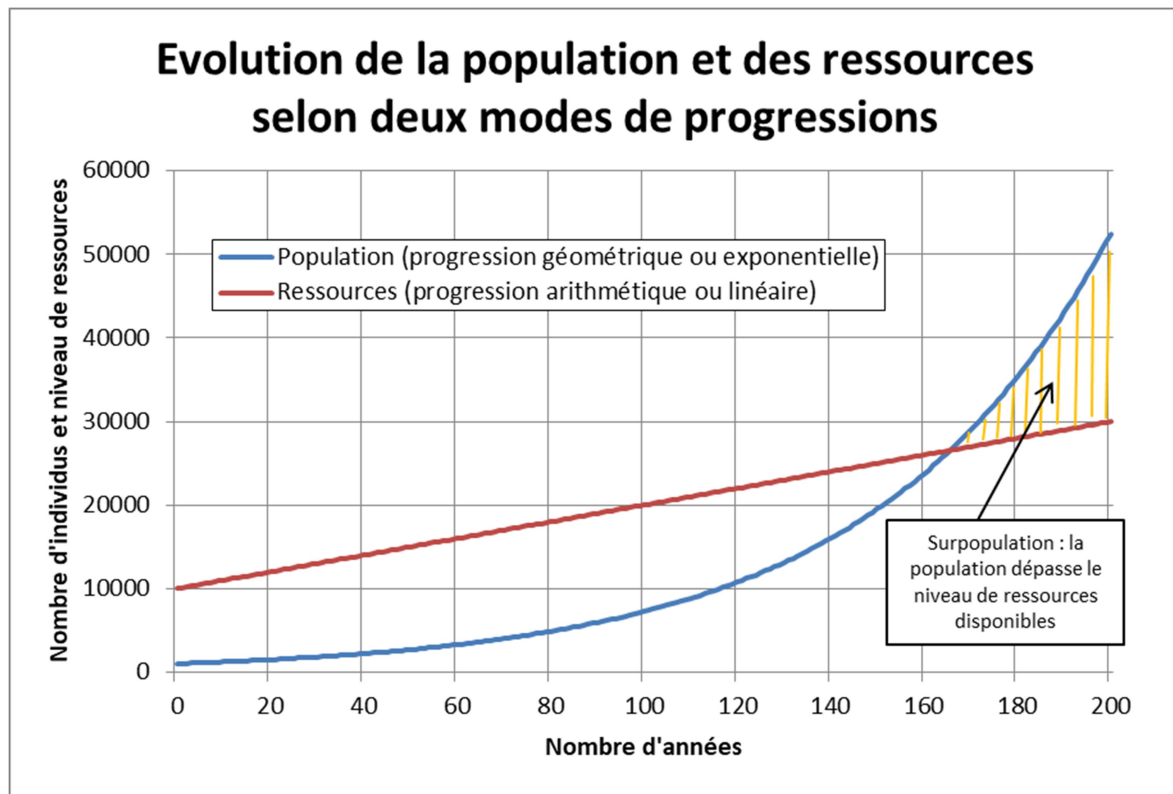


Figure 1 : Evolution de la population et des ressources selon deux modes de progression (calcul de l'auteur)

Dans cette configuration, la population peut s'accroître normalement entre $t=0$ et $t=165$. Mais à partir de 166^e année, la population dépasse les ressources disponibles. On entre alors dans une période de surpopulation qui ne peut être durable à long terme.

Dans la pensée de Malthus, la population est « rappelée » vers le niveau de ressources disponible via deux mécanismes principaux. Tout d'abord les mécanismes de rappel « positifs » qui concernent les événements ayant tendance à raccourcir la durée de vie des individus (famines, épidémies, guerres...) Dans cette logique, ce type d'évènement ne survient que dans les périodes de surpopulation. Un autre type de mécanisme de rappel sont les rappels « préventifs » qui consistent en des restrictions morales comme l'abstinence ou le décalage de l'âge au mariage mais aussi la mise en place de politiques de restrictions de la fertilité pour certains groupes sociaux, en particulier les pauvres qui ne pourraient pas subvenir aux besoins de leur descendance. Malthus insistait sur le rôle de l'éducation pour faire comprendre à chacun la nécessité de limiter sa propre fertilité et la rendre compatible

avec son niveau de vie. Cette limitation volontaire est dans l'intérêt de tous, car elle permet d'épargner à la société de maux bien plus violents dans le cas des rappels « positifs ».

On a donc vu que les différences de progressions entre population et ressources conduit toute société, si rien n'est fait, à une catastrophe démographique (aussi appelée catastrophe malthusienne) et une paupérisation rapide. Cette paupérisation pourrait être empêchée par la mise en place de politique de contrôle des naissances en particulier en abandonnant toute aide au revenu des plus pauvres. Ces dernières auraient en effet tendance à favoriser la fécondité de ce groupe social.

La théorie économique classique, s'inscrivant dans la tradition de Malthus a dans un premier temps décrit la croissance démographique comme un frein à la croissance économique (Sundrum 1987). En effet, une forte natalité risque de réduire la croissance en empêchant l'accumulation de ressources en capital au niveau individuel. C'est l'effet malthusien de « dilution de capital » (Brander 1994). Coal et Hoover dans leur ouvrage Population Growth and Economic Development in Low Income Countries publié en 1958 identifient 3 aspects négatifs de la croissance démographique sur la croissance économique. L'effet de dilution du capital (capital-shallowing effect), en raison de l'augmentation du nombre de travailleurs, est bien évidemment évoqué. L'effet de « dépendance à l'âge » (Age-Dependency Effect) qui tient au rajeunissement de la population en période de forte croissance démographique conduit à diriger davantage de flux monétaires vers la consommation plutôt que vers l'épargne empêchant l'accumulation de capital et donc le décollage économique. Un troisième effet négatif, dit effet de déviation de l'investissement (Investment-Diversion Effect), toucherait également les dépenses publiques qui seraient orientées vers des secteurs comme la santé ou l'éducation plutôt que vers des investissements directement productifs (infrastructures de transport, politique industrielle...).

L'émergence de modèles économiques de plus en plus complexes (modèle à un seul secteur, modèles duals et modèles multi-secteurs) a globalement continué à confirmer l'intuition générale d'un effet négatif de la croissance démographique sur la croissance économique. C'est par exemple le cas de l'étude d'Arthus et McNicoll qui a démontré l'effet négatif d'une croissance démographique trop importante dans le cadre d'un modèle multi-secteur (Arthur 1975).

La Banque Mondiale dans son World Development Report de 1984 vient clore une période où la croissance démographique est vue comme un frein exogène au développement et à la croissance économique. Le rapport se fait ainsi écho des dangers d'une croissance démographique durablement supérieure à la croissance économique rappelant que si la révolution industrielle s'est faite en Europe avec une population en croissance de 1,5% par an, elle est à l'époque de 4% dans les pays en voie de développement. La Banque pointe le fait qu'une forte démographie enferme les pays en développement dans une forme de trappe à pauvreté du fait de la difficulté à construire un réseau d'infrastructure (transport, éducation) adapté à la taille de la population. De plus, tout ralentissement économique voit ses effets décuplés (baisse du revenu par tête) notamment sur les catégories les plus pauvres en raison d'une structure d'emplois qui leur est défavorable. De telles considérations pouvaient s'appuyer notamment sur des travaux effectués dans les années 1970 en Inde et qui liaient l'inefficacité de la forte croissance économique pour réduire la pauvreté avec la surpopulation qui frappait le pays (Dankebar 1971).

2. La démographie comme grand revirement de jurisprudence pour la science économique : la mise en avant de ses aspects positifs pour le développement.

Au tournant des années 1980, la littérature économique voit émerger une conception totalement antagoniste de la croissance démographique. Cette dernière est vue à présent comme un facilitateur du développement voire sa cause première, et non plus sa conséquence incontrôlée.

Ce mouvement est principalement dû à l'accumulation d'enquêtes empiriques qui remettent en cause le lien négatif qui semblait exister jusqu'alors entre démographie et développement économique. On se rend compte en particulier que la croissance économique des pays en développement a été bien plus forte qu'attendue compte tenu de leur dynamique démographique défavorable. En effet, les pays en développement ont malgré tout expérimenté des taux de croissance non négligeables (Sundrum 1987) et parfois bien supérieurs à leur croissance démographique (ce fut notamment le cas de la Chine Populaire).

La perception de la croissance démographique comme support du décollage économique était déjà en germe chez certains auteurs bien avant les années 1980. C'est en particulier le cas lors de la grande dépression des années 1930, où la faible croissance démographique de l'époque

est vue par certains économistes comme Keynes et Hansen comme un facteur pour expliquer la déprime durable la demande agrégée. L'économiste John Hicks évoque même prudemment dans son livre Value and capital paru en 1939 les fondements démographiques des progrès économiques de son temps :

On ne peut réprimer la pensée que, peut-être, la Révolution Industrielle de ces deux derniers siècles n'a en fait été qu'un immense bond séculaire, largement provoqué par l'augmentation sans précédent de la population
(Hicks 1939, traduction de l'auteur)

Dans les années 1960, l'économiste Colin Clark expliquait en 1967 dans son livre Population Growth and Land Use qu'une fertilité élevée, un âge au mariage précoce et donc une croissance démographique rapide est presque toujours liée positivement à la croissance économique et à l'augmentation du niveau de vie. Pour argumenter son propos il y citait notamment les économistes Allyn Young et Alfred Sauvy qui avaient montré qu'une augmentation de la population était respectivement liée à une augmentation des économies d'échelles au niveau global et au niveau des dépenses publiques. Il cite également la loi de Verdoorn qui explique la croissance de la production totale par la croissance de la productivité, cette dernière pouvant se lire comme une conséquence de la croissance démographique (Boulier 1984). Il s'inscrit en faux contre la pensée dominante de son époque en affirmant qu'une augmentation de la population conduit non pas à une dilution du capital mais au contraire à augmenter la quantité d'épargne disponible.

Quelques années auparavant, l'économiste danoise Ester Boserup, avait mise en avant le fait que la pression démographique pouvait être l'élément clé qui aurait induit un progrès technologique dans le domaine de l'agriculture. En effet, l'approche boserupienne, qui s'oppose sur ce point à l'approche malthusienne (Kremer 1993), explique qu'une population est forcée à adopter une nouvelle technologie lorsque le taux de croissance de la population ne peut plus être supporté par la technologie existante. Cette approche de la démographie comme incitation à l'innovation est totalement novatrice et sera plus tard généralisée à d'autres secteurs de l'économie.

Mais le réel tournant doctrinal de la science économique est bien à situer dans les années 1980 avec la parution en 1986 d'un rapport du *National Research Council* des États-Unis intitulé

Population Growth and Economic Development: Issue and Evidence présentant 17 papiers de recherche visant à relativiser l'idée que la croissance démographique est un frein pour le développement. Ce rapport contient notamment un article de T. N. Srinivasan démontrant que pour un certain nombre de famines récentes, leur cause était davantage à chercher du côté de politiques publiques non adaptées que du côté de la surpopulation.

David Bloom et Richard Freeman ont dans le même rapport confirmé les intuitions de Verdoorn, l'augmentation de la population ayant entraîné dans les pays en développement un choc de productivité et *in fine* permis d'absorber le choc de demande en nouveaux emplois. Ils soulignent également que ce choc démographique a été absorbé par la modification de la structure de l'emploi : le secteur agricole a ralenti son développement tandis que les secteurs industriels et tertiaires prenaient davantage d'importance. En un sens, il s'agit déjà de la traduction à ces deux secteurs économiques de la logique malthusienne de pression démographique comme moteur de l'innovation. Enfin un dernier article d'Elizabeth King remet en cause le lien entre taille de la famille et richesse. Celle-ci conclut qu'une fertilité élevée ne semble pas causer la pauvreté (King 1985). Cette affirmation est cohérente avec les travaux de Clark et Hamilton qui montrent qu'en période de transition démographique ce sont les individus les plus riches qui ont la descendance la plus nombreuse (Clark et al. 2006).

3. De l'optimisme démographique à la crainte écologique: le tournant des années 1990 où comment l'économie cherche à mieux comprendre les évolutions de population

La décennie 1990 referme assez rapidement la période « d'optimisme démographique » des années 1980. C'est moins le retour des craintes de surpopulation qui avait cours auparavant (c.f. le film « soleil vert ») que le développement de nouvelles craintes écologiques concernant l'épuisement des ressources qui ramène les questions démographiques sur le devant de la scène. En effet, la démographie devient coupable des dérèglements écologiques de deux manières. Dans les pays en développement, la croissance démographique est vue comme la cause principale de l'augmentation des pollutions et des effets néfastes de l'emprise humaine (déforestation, urbanisation, développement de l'agriculture intensive...). Dans les pays développés, la croissance démographique semble avoir été enrayée, mais principalement

en raison du fort développement économique. Or ce fort développement économique est responsable de la majorité de l’empreinte écologique actuelle de l’humanité : les flux de marchandises tout comme les émissions carbone y sont en effet principalement concentrés. La démographie humaine est donc une deuxième fois coupable car pour enrayer sa progression problématique il est nécessaire de recourir à un remède pire que le mal d’un point de vue écologique : la croissance économique.

À nouveau, pour trouver les racines de ce mouvement écolo-pessimiste en matière démographique, il faut se plonger en amont des bornes chronologiques ici proposées : le rapport du club de Rome, publié en 1972 sous la forme d’un livre titré The limits to growth et co-écrit notamment par les époux Meadows et l’économiste William Behrens. Ce rapport proposait une modélisation informatique du monde qui concluait à la non soutenabilité d’une croissance économique et démographique continue dans un monde aux ressources finies.

Le modèle informatique servant de base à ce rapport, appelé « world3 » a été un précurseur des approches dites « system model » qui contrairement aux approches prévisionnistes précédentes évite de projeter linéairement les tendances passées et permet de tenir compte des événements historiques (Cohen 1996). Ce modèle se base sur les travaux précurseurs de Forrester et son modèle informatique « wolrd2 ». Même si les approches « system model » permettent d’utiliser la puissance de calcul des ordinateurs pour générer des prévisions moins simplistes qu’auparavant, elles n’en restent pas moins exemptes de nombreuses limites méthodologiques. En effet, même si le nombre de variables étudiées dans le modèle world3 reste limité en nombre (population, nourriture, industrialisation, ressources non-renouvelables, pollution), le nombre de sous-éléments qui déterminent leur évolution est beaucoup plus important sans que les relations entre la variable et ses déterminants reposent nécessairement sur des travaux de recherche antérieurs. Ainsi, la fertilité de la population déterminant la population, repose dans le modèle world3 sur 6 facteurs dont la taille de la population, 22% de femmes en âge de procréer dans la population totale, 30 ans de période reproductive par individu, la moyenne du nombre d’enfant désiré... On voit donc que certaines variables sont choisies arbitrairement parfois sans lien avec les chiffres observés. Même si le rapport de Meadows et al. a permis de gagner en réalisme dans les prévisions de population, il a également omis de nombreux éléments qui auraient pu influencer cette évolution démographique comme par exemple les différences entre pays ou entre groupes

sociaux, l'influence des décisions politiques ou des progrès pour combattre la pollution. En conséquence, le rapport n'a pas eu de capacité prédictive forte, le modèle ne prévoyant ainsi pas la chute du taux de croissance de la population mondiale qui se produisit juste après sa publication en 1972.

Même si ce rapport s'inscrivait dans un contexte globalement défavorable à la croissance démographique, il portait cela de nouveau qu'il dénonçait non plus la croissance démographique comme un frein mais bien comme une cause de la croissance économique. En cela il augurait en partie les années 1980, dénonciation de la nature intrinsèquement négative du développement économique mis à part.

En effet, de nombreux économistes ont reproché aux approches liant positivement croissance démographique et développement leur oubli de prendre en compte les dégradations écologiques qu'engendraient ces phénomènes (Dasgupta 1995). Une littérature autour du Produit National Net, outil déjà ancien et qui cherche à prendre en compte les dépréciations du capital non prises en compte dans les instruments classiques de mesures de la richesse (le PIB), s'est d'ailleurs développée dans les années 1990 (Hartwick 1990, Brekke 1994, Asheim 1994). Ce retour d'intérêt est principalement dû à l'émergence de l'économie écologique qui fait du PNN un instrument pour mesurer la dépréciation du capital naturel. L'idée est qu'une dépréciation trop importante de ce capital vient amputer à long terme des possibilités de production. Cet indicateur rend donc compte du caractère non durable du développement économique actuel.

Un mouvement concomitant de la science économique cherche également à mieux comprendre les sous-jacents qui expliquent la croissance démographique, s'inscrivant dans le double mouvement des années 1980 et 1990 qui voient tous deux la démographie comme une des cause principale du développement économique. Dès lors il est important de mieux connaître pourquoi la croissance démographique s'est accélérée au début de la révolution industrielle et comment certaines populations ont transité démographiquement comme ce fut le cas dans les pays développés. Une connaissance plus approfondie de la mécanique démographique permettrait en effet à la fois de mieux la contrôler et de mieux la prévoir.

Différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer la baisse de fertilité qui s'est produite dans les pays développés afin d'éventuellement en reproduire le schéma dans les pays en

développement. La première de ces hypothèses est que l'augmentation rapide du revenu par habitant a conduit à diminuer la fertilité, puisque les individus avec un revenu plus important vont avoir un potentiel de revenu sur le marché du travail lui-même plus important. Cela incite donc les parents à investir dans la qualité plutôt que la quantité de leur descendance (Becker 1991, p.144). En d'autres termes plus le retour sur investissement, par exemple dans l'éducation des enfants, est important et plus une hausse du revenu est liée à une baisse de la fertilité. Cependant cette hypothèse signifie que l'on peut lier la transition démographique à un niveau de revenu particulier. Or il semble qu'au 19^e siècle la transition se soit effectuée concomitamment dans différents pays européens alors que leur revenu variait du simple au triple (Galor 2008). D'autres hypothèses ont mis en avant le déclin du travail des enfants (Hazan and Berdugo 2002), l'augmentation de l'espérance de vie (Moav 2005), le déclin des différences de genres (Galor and Weil 1999) ou encore la mise en place de système de protection sociale (Caldwell 1976) afin d'expliquer ce déclin de la fertilité dans les pays développés.

De cette période d'émulation intellectuelle, c'est l'hypothèse d'un lien fort entre fertilité et demande en capital humain qui a connu la plus grande postérité et de nombreuses validations empiriques (Farroq 1987, Dasgupta 1995). Cette approche par le Capital Humain a été formalisée par Galor dans la « théorie de la croissance unifiée » (Unified Growth Theory, UGT) qui permet de modéliser assez fidèlement (dans l'état des connaissances actuelles) l'évolution démographique de l'humanité depuis ses débuts (Galor 2000). Galor identifie 3 phases principales : malthusienne, post-malthusienne et le régime moderne de croissance. La phase malthusienne se caractérise par une croissance technologique et démographique faible ces deux éléments combinés amenant à une stagnation du revenu par habitant. Cette phase a concerné la majorité de l'histoire humaine jusqu'au début du 19^e siècle. La phase post-malthusienne se traduit par une accélération du progrès technique conduisant à une augmentation rapide du revenu disponible et qui n'est qu'en partie annulé par la croissance démographique. Enfin le régime moderne de croissance se caractérise par une inversion du lien entre croissance du revenu et croissance démographique : la population stagne ou diminue tandis que le revenu augmente. Ce régime caractérise les pays développés à partir des années 1990. Dans le modèle UGT ce n'est pas l'augmentation du revenu par tête qui a poussé les parents à investir dans la « qualité » de leurs enfants mais bien l'accélération du progrès technologique qui induit une augmentation de la demande en capital humain. Cette

demande accrue augmente ainsi le retour sur investissement dans le capital humain, ce qui permet d'en faire l'explication fondamentale de la chute de fertilité.

Le niveau de capital humain est ainsi utilisé pour prévoir la population dans les rapports du GIEC ou de la Commission européenne. En effet, le GIEC dans son rapport de synthèse de 2014 explique à la page 4, que les émissions de CO₂ ont augmenté en raison de la croissance économique et de la croissance démographique. En conséquence le GIEC établit des scénarios d'émissions de CO₂ en tenant compte de l'évolution de la population. Pour cela il s'appuie non pas sur les prévisions de l'ONU, qui adopte une méthode de projection par cohortes et composantes mais sur une méthode développée par l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) basée en Autriche. Cette dernière inclut notamment dans ses projections le niveau d'éducation actuel et prévu des populations en raison de la forte influence de cette variable sur le taux de fertilité (Lutz, W. et al. 2014). Ainsi sur l'exemple du Nigeria qui comptait 160 millions d'habitants en 2010, l'IIASA prévoit à l'horizon 2100 une population de 576 millions d'individus contre 914 millions pour l'ONU. Les scénarios d'émissions de CO₂ sont donc en partie construits en fonction de différentes hypothèses d'évolution de population tenant compte des niveaux de capital humain.

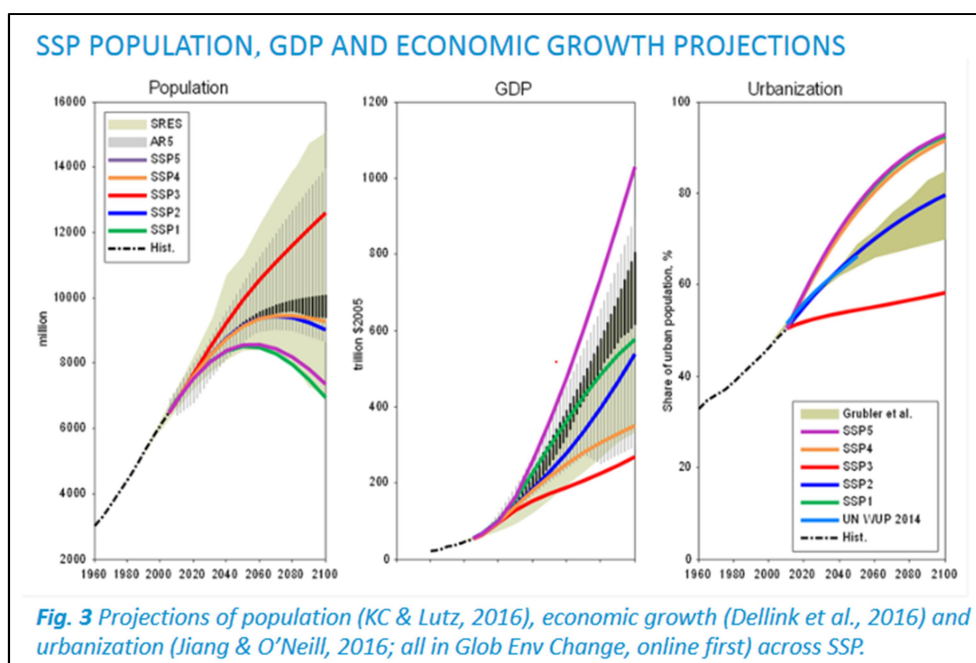


Figure 2 : niveau de population, de PIB et de taux d'urbanisation pris en compte dans les différents scénarios d'émissions de CO₂ (source Lutz 2016)

On voit ainsi sur la figure 2 que le scénario SSP3 (Shared Socio-economic Pathways) est un scénario qui lie faible niveau de PIB et d'urbanisation avec un niveau élevé de population. A l'inverse le scénario SSP5 prévoit un niveau élevé de PIB et d'urbanisation mais une population en déclin à partir de 2060. Ces deux scénarios (SSP3 et SSP5) sont les deux scénarios prévoyant le plus d'émissions en gaz à effet de serres avec respectivement des concentrations en CO₂ de 850 et 1000 ppm, soit un niveau plus de deux fois supérieur au niveau actuel (410 ppm en 2019). A l'inverse, les scénarios SSP1 et SSP2 sont les moins « émissifs ». Cela semble bien correspondre à la vision que « population » et croissance économique » sont les deux variables principales responsables des émissions humaines de gaz carbonique. Ces simulations semblent également se baser sur le postulat d'un lien négatif entre croissance économique et population.

4. L'importance de l'énergie pour la croissance économique : un complément à la théorie de la croissance unifiée ?

Parallèlement à la compréhension des phénomènes démographiques par la science économique, un autre champ de recherche qui s'intéresse aux liens entre énergie et économie requiert aussi notre attention.

Les modèles macro-économiques classiques prennent rarement en compte l'énergie comme facteur explicatif de la croissance économique. En revanche ces modèles intègrent depuis Solow (1956) une composante de « progrès technique » pour expliquer la croissance résiduelle qui n'est expliquée ni par le capital ni par le travail. Cette composante résiduelle aussi appelée « résidu de Solow » explique pourtant 60% des variations de taux de croissances entre pays (Durlauf 2001) et près de 40% de la croissance en Amérique du Nord (Giraud 2015).

De même les travaux récents de nombreux économistes comme Jones (1998), Aghion & Howitt (1998) ou encore Jean Tirole (prix nobel d'économie en 2014) dans son dernier livre Economie du Bien Commun (2015) n'évoquent pas une seule fois le terme d'énergie. Les travaux de Galor (2005) qui prennent en compte le capital humain comme variable explicative supplémentaire pour expliquer la croissance économique omettent eux aussi d'y inclure l'énergie.

Cette non prise en compte de l'énergie dans les modèles de croissance est généralement justifiée par le « cost share theorem » qui énonce que les élasticités des facteurs de production sont égales à leur part dans le PIB total (Court 2016). Ainsi dans un pays industrialisé comme les États-Unis, les revenus du travail représentent 70% du PIB tandis que les revenus du capital représentent environ 30%. Une fonction de production néo-classique Cobb-Douglas va donc allouer respectivement au travail et au capital une élasticité de 0,7 et 0,3. La part des dépenses d'énergie dans le PIB étant proche de 5 à 6%, les économistes néo-classiques ont donc tendance à négliger ce facteur dans leur modèle de croissance.

Cependant, les expériences historiques ont eu tendance à nuancer la pertinence de cette approche par les prix. En effet, le choc pétrolier de 1973 a vu l'énergie consommée aux États-Unis baisser de 7%. La part des dépenses énergétiques étant de 5% du PIB, ce dernier aurait donc dû baisser de $0,07 \times 0,05 = 0,35\%$. Or la production a en réalité baissée de 5% soit 14 fois plus.

Outres ces contre-exemples empiriques, des travaux comme ceux de Kummel (2011) ont montré qu'ajouter la variable « énergie » au modèle de Solow faisait quasiment disparaître le résidu de Solow. Avant lui, Ayres et Warr (2005) étaient également parvenu à faire disparaître ce résidu en tenant en compte de cette composante énergétique. Dans ce modèle, qui ne concernait que le cas des États-Unis, l'énergie (Work) représentait une élasticité de 0,7 par rapport au PIB, le capital une élasticité environ égale à 0,3, la variable du travail humain « Labor » ne représentant qu'une élasticité marginale :

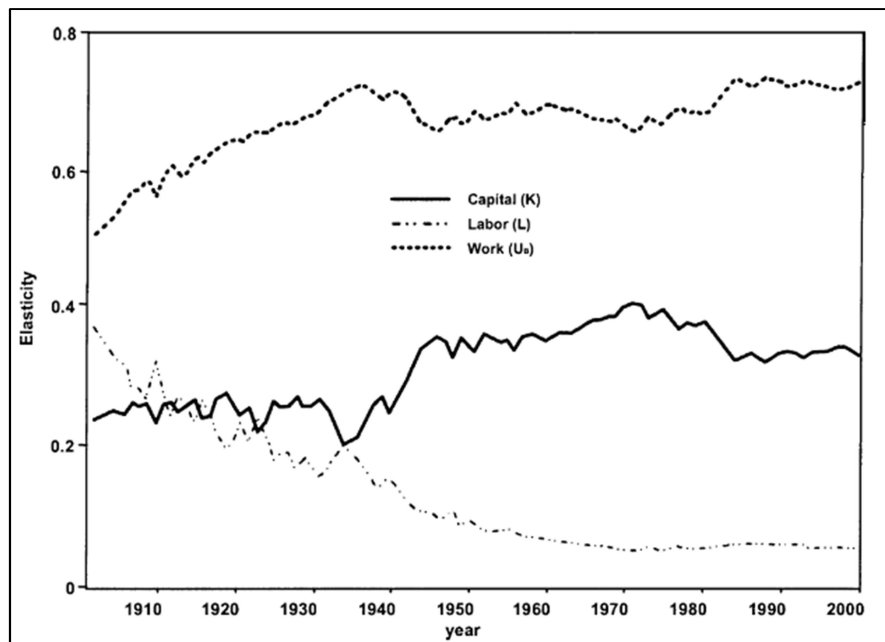


Figure 3 : élasticité du capital, du travail et de l'énergie aux États-Unis 1900-2000
(source : Ayres et Warr 2005)

Giraud et Kahraman (2014) ont répété l'exercice en l'élargissant à l'étude de 33 pays sur la période 1970-2011. L'élasticité de l'énergie par rapport au PIB est comprise entre 0,4 et 0,7 avec une moyenne de 0,6, très proche de l'étude d'Ayres. De plus, cette étude établit un lien causal entre augmentation de la consommation d'énergie et augmentation du PIB.

C'est sur cette question du lien de causalité entre énergie et croissance que la littérature économique est la plus divisée.

La première occurrence d'un tel test remonte à 1978 où un modèle bivarié consommation d'énergie et PIB sur la période 1947-1974 aux États-Unis a montré à l'aide d'un test de causalité de Granger standard que le PIB causait de manière unidirectionnelle la consommation d'énergie. Cependant ce type de modèle bivarié a été critiqué notamment en raison du biais d'omission de variables. Cependant les modèles multivariés qui ont plus tard testé cette relation n'ont pas permis de dégager de consensus sur la direction de la causalité.

Dans l'étude de la Chine, Zhang et Cheng (2009) sur la période 1960-2007 n'ont par exemple pas trouvé de relation causale de l'énergie vers la croissance économique alors que Shahbaz et al. (2013) ont au contraire trouvé sur la période 1971-2011 que l'énergie causait au sens de

Granger la croissance économique à court et long terme. Dans le cas des États-Unis, l'étude de Soytaş et Sari (2006) a montré sur la période 1960-2004 une causalité de la consommation d'énergie vers le PIB, tandis que l'étude de Huang et al. (2008) montre une causalité inverse sur la période 1972-2002.

Ces différences de résultats peuvent s'expliquer en partie par les conditions spécifiques à chaque pays ou les périodes d'observation différentes mais également par des biais méthodologiques ou de variables omises. Ainsi l'étude de Zhang et Cheng sur le cas Chinois inclut 5 variables différentes dont le PIB réel, la formation brute de capital fixe, la consommation d'énergie, les émissions de CO₂ et la population urbaine, qui sont ensuite intégrées dans un modèle VAR augmenté tel que développé par Toda et Yamamoto (1995). L'étude de Shahbaz contient quant à elle un ensemble de variables sensiblement différent contenant la croissance économique, le niveau d'accumulation de capital, de commerce international, et développement financier, la consommation d'énergie ensuite intégrée dans un modèle VECM pour étudier leurs dynamiques de court terme.

Une autre différence qui est peu relevée mais qui nous apparaît comme centrale est le problème concernant les bases de données et les différences de valeurs et d'unités qui peuvent s'en suivre. Huang utilise par exemple la consommation d'énergie par habitant exprimées en kilogrammes d'équivalent pétrole fournis par l'Agence Internationale de l'Energie de même que Shahbaz et Soytaş avec les données du « World Development Indicator » de la Banque Mondiale tandis que Zhang utilise la consommation d'énergie totale (sans l'exprimer par habitant) exprimée en kilotonnes d'équivalent charbon standard fournis par le Bureau National de Statistique de Chine.

Malgré ces différences d'unité et de source, ces études semblent cependant toutes ne prendre le concept « d'énergie » que comme un bloc en ne cherchant par exemple pas à étudier séparément les effets du pétrole, du charbon, du gaz pour les énergies fossiles, des énergies renouvelables et du nucléaire pour les énergies non carbonées.

Les premières études à avoir réalisé ce travail d'analyse désagrégée des sources d'énergies sont les études de Herrerías et al. (2013) et Fang et al. (2017) concernant les provinces chinoises. L'étude de Fang utilise la méthode des données de panel en raison de la faible période historique considérée (1995-2014) et du nombre relativement élevé des provinces

chinoises étudiées (30 provinces Tibet exclu). Cette analyse a pour but de repérer les régions où le PIB est le plus dépendant de certaines formes d'énergie afin d'adapter la pollution de baisse des émissions de CO₂ aux caractéristiques provinciale. Le but final étant d'impacter le moins possible la croissance économique chinoise. L'étude de Fang, outre le fait d'actualiser les données de l'étude de Herrerias, adjoint aussi à l'analyse une variable de capital humain, une étude de Whalley et Zhao (2013) ayant montré que 38% de la croissance du PIB chinois entre 1979 et 1998 s'expliquait par la hausse du capital humain.

Fang et al. (2017) aboutissent ainsi à un panorama complet des provinces chinoises et des dépendances de chacune aux différentes sources d'énergie existantes :

A summary of Granger causal relationship between disaggregate energy and GDP.

Regions	Provinces	Energy?GDP	Rawcoal?GDP	Coke?GDP	Crude Oil?GDP	Petroleum product?GDP	Natural gas?GDP	Electricity?GDP
North China	Beijing	○	○	○	→**	○	→**	○
	Tianjin	○	→*	○	○	→***	→***	○
	Inner Mongolia	←	→**	→***	○	→***	→**	→**
	Shanxi	→	○	→**	○	→***	○	○
Northeast	Hebei	→	→**	→***	○	○	○	○
	Liaoning	○	→**	○	○	○	→**	→**
	Jilin	←	→**	→**	→*	○	○	→**
East China	Heilongjiang	←	○	○	○	→*	○	→**
	Shanghai	○	→*	→*	○	→**	→**	○
	Jiangxi	○	→***	→*	○	○	→**	→**
	Jiangsu	←	→**	○	→**	→***	→***	→***
	Anhui	←	→**	○	○	○	→**	○
	Shandong	←	→*	○	○	→**	→**	○
	Zhejiang	→	→*	○	○	→**	→**	→***
Central China	Fujian	→	→***	→**	○	→*	○	○
	Hubei	○	○	○	→*	→**	→*	○
	Hunan	○	○	○	○	→**	○	○
South China	Henan	→	→***	→***	→*	○	→***	○
	Guangdong	○	○	○	○	○	○	○
	Guangxi	○	→*	○	○	○	→***	→**
Southwest	Hainan	←	○	→**	○	○	○	○
	Chongqing	←	○	→**	→*	→**	○	○
	Guizhou	←	→*	→***	○	→***	→**	○
Northwest	Sichuan	→	→**	→**	○	→**	→***	→***
	Yunnan	→	→**	○	○	→***	○	○
	Gansu	○	○	○	○	○	○	○
	Ningxia	○	○	→***	○	→*	○	→***
	Xinjiang	○	○	→**	○	○	○	○
	Shaanxi	←	○	○	→**	○	○	○
	Qinghai	←	○	→**	○	○	○	○

Notes: (i) The notations →, ←, and ↔ indicate the direction of Granger causal relationship between energy variable and GDP, and ○ indicates the absence of Granger causal relationship; (ii) crude oil consumption data in Shanxi and Guizhou are missing.
*** Denote the significance level of 1%.
** Denote the significance level of 5%.
* Denote the significance level of 10%.

Figure 4 : Résultats des tests de causalités entres sources d'énergie et PIB (source : Fang et al. 2017)

Ainsi, les auteurs recommandent d'éviter d'appliquer des politiques d'économie d'énergie pour les provinces de Shanxi et Hebei en raison de leur forte consommation de charbon qui semble causer le PIB au sens de Granger. De même pour les provinces de Mongolie Intérieure et du Jiangsu en raison de la relation bidirectionnelle de la causalité entre consommation de charbon et PIB. Ces deux dernière provinces présentant pourtant si l'on prend l'énergie au

sens agrégé, une causalité qui va du PIB vers l'énergie, d'où l'intérêt d'observer les relations de dépendance source d'énergie par source d'énergie.

En revanche les provinces de Liaoning et Guizhou peuvent adopter des politiques de baisse des émissions de CO2 par exemple en transitant vers le gaz ou le pétrole, moins émetteurs de gaz à effets de serre. En effet, le charbon semble être causé par le PIB au sens de Granger. De plus, la consommation de gaz semble causer le PIB ce qui permet d'être confiant quant à l'effet non récessif d'une politique de baisse des émissions de carbone.

Bilan de la revue de littérature

On peut distinguer 3 phases historiques de la manière dont la science économique appréhende le phénomène démographique.

Une première phase « malthusianiste » considère que la croissance démographique est un frein à la croissance économique empêchant l'accumulation de capital. La population évolue plus vite que l'extraction des ressources avant de s'effondrer rapidement et de redémarrer un cycle de croissance.

Une seconde phase « nataliste », à partir des années 1970, mais dont les prémices remontent aux années 1930, considère au contraire la population comme un moteur de la croissance économique notamment en raison de l'incitation à l'innovation qu'elle provoque. La consommation de ressources est ici une conséquence de la croissance démographique.

Une troisième phase, dans les années 1990, synthétise ces deux analyses. De la phase nataliste l'analyse reprend l'idée que la croissance démographique est un des principaux moteurs de la croissance économique à court terme. De la phase malthusienne elle reprend l'idée qu'à long terme la consommation de ressources sera un facteur freinant la croissance. Elle introduit la notion de développement durable mariant consommation raisonnée des ressources naturelles et démographie maîtrisée. Pour cela la science économique a cherché à mieux comprendre les raisons de ce phénomène. La théorie de la croissance unifiée qui lie augmentation du niveau d'éducation et baisse de la fertilité est la théorie qui a connu le plus

grand succès.

L'aboutissement de la réflexion qu'a menée la recherche économique au cours de l'histoire peut donc être schématisé comme suit :

Population → Croissance économique

Parallèlement à la question démographique plusieurs économistes se sont penchés, principalement à partir des années 1970 sur les liens entre énergie et croissance économique. En effet, l'idée est qu'en intégrant l'énergie comme variable explicative du PIB on parvient à éliminer la majorité du résidu de Solow. Autrement dit l'énergie serait un facteur au moins aussi important que ne l'est le capital ou le travail. D'autres travaux se penchant sur le lien de causalité qui existe entre énergie et croissance économique ont pu démontrer que dans de nombreux pays et parfois même au niveau régional, l'énergie causait de manière unilatérale et positive la croissance économique. On peut synthétiser ces idées comme suit :

Énergie → Croissance économique

En partant de ces deux résultats de la science économique on obtient deux variables explicatives pour un même phénomène. Notre mémoire s'interroge donc sur l'existence d'un lien entre ces deux variables qui apparaissent causales.

¿ Énergie ↔ Population ?

En effet, il existe peut-être une chaîne de causalité plus ample signifiant que l'une des deux variables agit en réalité comme une variable « écran ».

II. Base de données :

Deux variables vont être utilisées dans ce mémoire de recherche. D'une part, la variable énergétique, désagrégée en ses différentes composantes suivant la période historique considérée (charbon, pétrole, gaz naturel, hydroélectricité, nucléaire, énergies renouvelables). D'autre part la variable démographique qui va se concentrer uniquement sur le nombre d'habitants que compte la France. Les tables de mortalité et de natalité ne sont pas utilisées mais pourraient éventuellement l'être si des recherches plus approfondies sont menées par la suite.

La source des données pour ces deux variables est l'annuaire statistique de la France accessible en ligne sur le portail internet *Gallica* de la Bibliothèque Nationale de France jusqu'en 2007 date de l'arrêt de sa publication. La période 2008-2017 est couverte concernant les données énergétiques en recourant principalement au *BP Statistical Review of World Energy* publiée par l'entreprise pétrolière britannique British Petroleum depuis 1965. Les données de population sont quant à elles issues du portail de données de la Banque Mondiale.

1. Les données démographiques

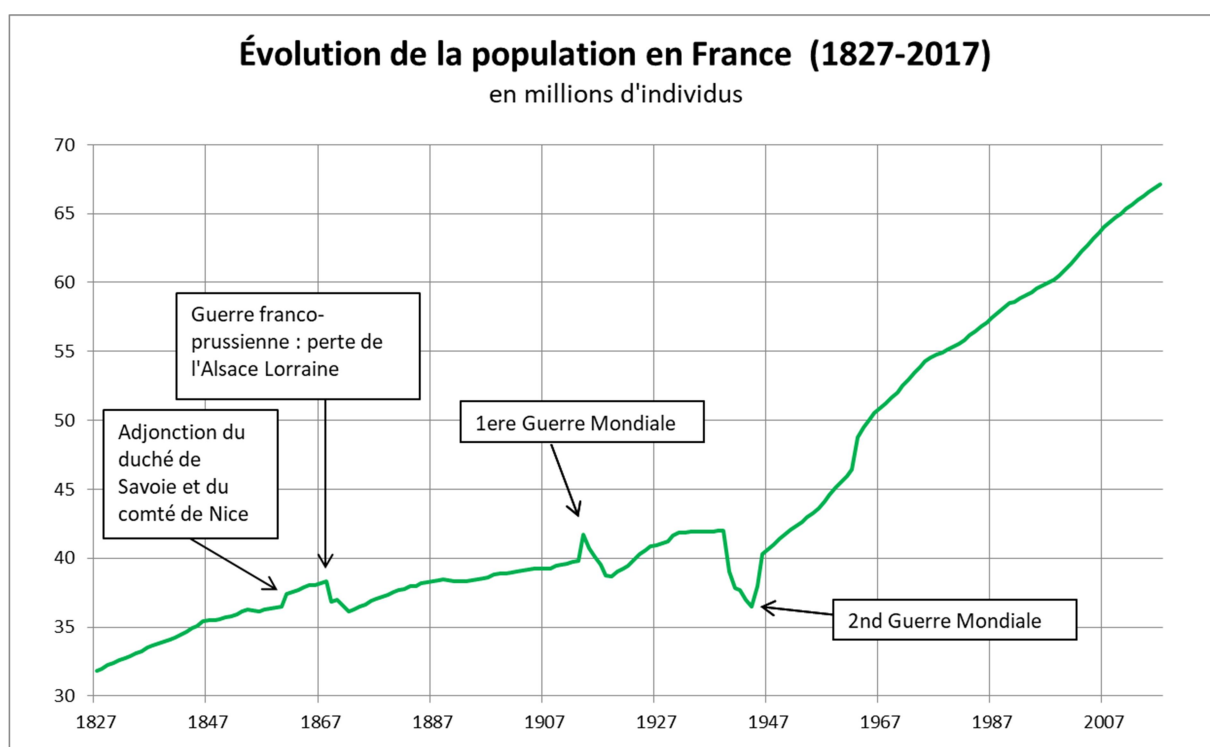


Figure 5 : évolution de la population en France entre 1827 et 2017 (source : Annuaire Statistique et Banque Mondiale)

La France a longtemps été un géant démographique en Europe. En effet elle compte au XVII^e siècle entre 21 et 22 millions d'habitants, contre 5 millions en Angleterre et 2 millions aux Pays-Bas. Un européen sur 5 est français (Bély 2009). Elle a déjà atteint des niveaux similaires dans l'histoire, avec 17 millions d'habitants en 1328 et 20 millions en 1500 (Béranger 1980). Néanmoins ces périodes sont entrecoupées d'événements tragiques qui engendrent de fortes décroissances démographiques comme l'épidémie de peste noire de 1347-1351 qui emporta entre 30 à 50% de la population européenne (Charbit 2015). Cependant toutes ces estimations sont sujettes à caution étant donnée l'absence de comptage régulier et centralisé de la population.

La population française est décomptée régulièrement depuis 1801, date de la mise en place d'une autorité statistique nationale (Bureau de la statistique) et d'un recensement officiel. Ces données peuvent être retrouvées dans l'annuaire statistique de la France qui récapitule l'évolution de la population depuis cette date. Pour les données à partir de 1960, nous nous sommes appuyés sur celles fournies par la Banque Mondiale. On peut constater que la population française est passée de 31,8 millions d'habitants en 1827 à presque 42 millions en 1939 à la veille de la Seconde Guerre Mondiale. Celle représente une augmentation de 32% sur la période ou encore 0,25% d'augmentation par an. C'est un rythme soutenu à l'échelle des temps historique mais plus faible que celui de pays voisins comme l'Allemagne ou le Royaume-Uni. En effet, l'Allemagne comptait en 1913 environ 50% d'habitant de plus que la France alors qu'en 1800 la France était deux fois plus peuplée que son voisin germanique (Pison 2012). De même pour le Royaume-Uni qui en 1944 comptait 10 millions d'habitants de plus que la France alors que cette dernière était comparativement 4 fois plus peuplée au milieu du XVIII^e siècle (Pison 2015).

On remarque aussi sur notre graphique de la population française que la croissance démographique devient de plus en plus faible avec le temps, du moins concernant la période antérieure à la Seconde Guerre Mondiale. Entre 1827 et 1868 l'augmentation est de 0,46% par an en moyenne. Elle passe ensuite à seulement 0,2% par an en moyenne entre 1871 et 1913. La période allant de 1919 à 1939 marque cependant un regain de croissance démographique puisque la population augmente de 0,4 en moyenne par année, un niveau tout de même inférieur à celui de 1827-1867. Néanmoins cette croissance soutenue est en partie due au niveau « artificiellement » bas de la population en 1913 due à la perte de l'Alsace-Lorraine et

du phénomène de « rattrapage démographique » (Dumont 2000, Mamelund 2004) qui permet de compenser tout ou partie du déficit démographique des périodes de conflit et de retrouver le niveau de population antérieur.

On peut tenter de corriger ces biais, en ajoutant aux années 1827-1860 environ 900 000 individus par an qui correspond à l'incrément de population dû au rattachement du Duché de Savoie et du Comté de Nice au territoire national. De même pour la période 1869-1913 où on ajoute chaque année environ 1,5 millions d'individus qui correspond à la perte de population due à la cession de l'Alsace-Lorraine à l'empire Allemand. Cette méthode est critiquable puisqu'elle suppose que les territoires adjoints ou cédés ont la même population d'année en année, ce qui est évidemment faux. Néanmoins comme on peut le constater sur le graphique suivant, cela permet de retirer une grande partie de l'artefact statistique qui nous préoccupe. On peut ainsi observer les chutes de population uniquement imputables aux effets des différents conflits et non plus ceux dus à des redécoupages territoriaux.

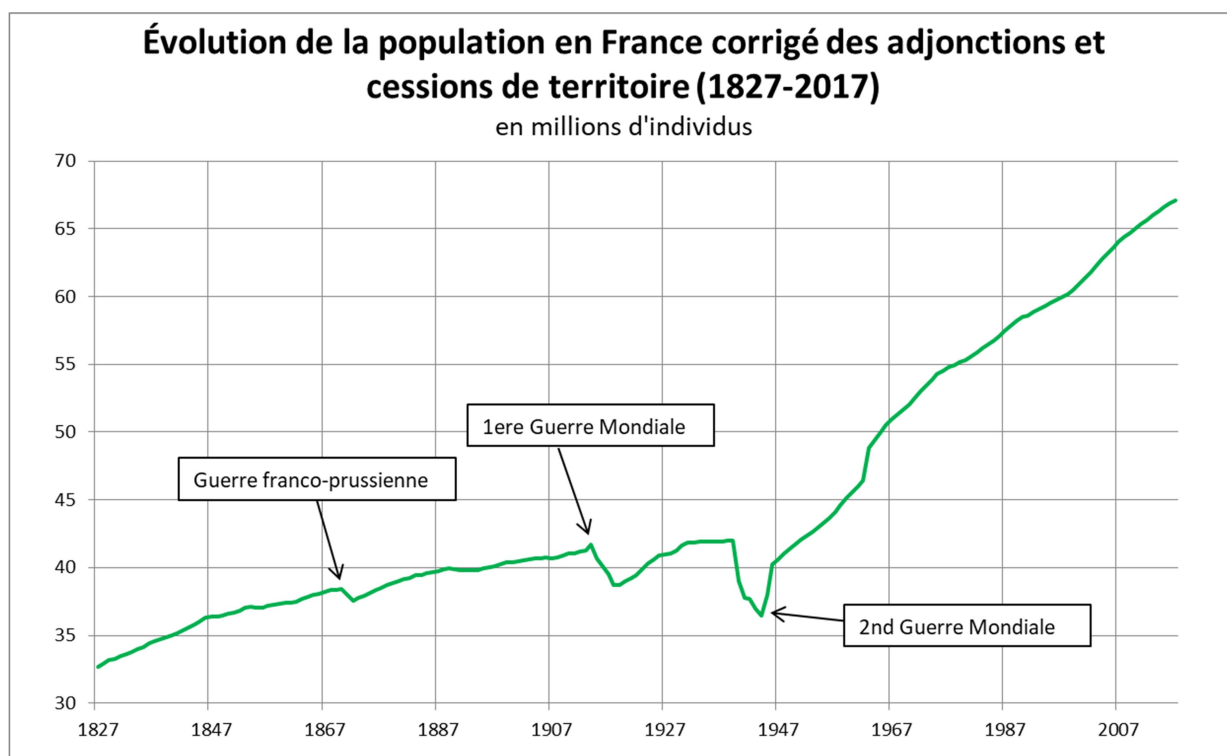


Figure 6 : évolution de la population en France corrigée des évolutions territoriales

En mesurant l'évolution de population à partir de cette base de données « corrigée » et en prenant comme découpage temporel les années où la population a terminé son rattrapage

démographique par rapport à l'état de démographique « pré-conflit » on obtient le découpage suivant :

Période	Augmentation annuelle moyenne de la population (en %)
1827-1868	0,39
1876-1913	0,17
1931-1939	0,04

Tableau 1 : Taux de croissance annuel moyen de la population française au cours de différentes périodes

On observe bien au fil du temps un fort ralentissement de la croissance démographique puisque on passe d'un taux d'accroissement annuel moyen de 0,29% entre 1827 et 1868 à seulement 0,04% entre 1931 et 1939.

Pourtant, à la suite de la Seconde Guerre Mondiale la population a repris son augmentation à un rythme soutenu. Entre 1951, date à laquelle elle retrouve son niveau de 1939, et 2017 la population française a cru de 0,71% par année en moyenne. Pour rappel c'est presque deux fois plus élevé que le taux d'accroissement moyen de la période 1827-1867 alors que cette dernière est quasiment deux fois moins étendue, ce qui limite la prise en compte de l'effet « d'essoufflement » que nous avons documenté entre 1827 et 1939.

Cette performance démographique est d'autant plus surprenante au regard de la théorie de la transition démographique qui veut que l'explosion démographique est un phénomène unique dans le temps, avec une baisse de la natalité qui suit avec retard le phénomène de baisse de la mortalité.

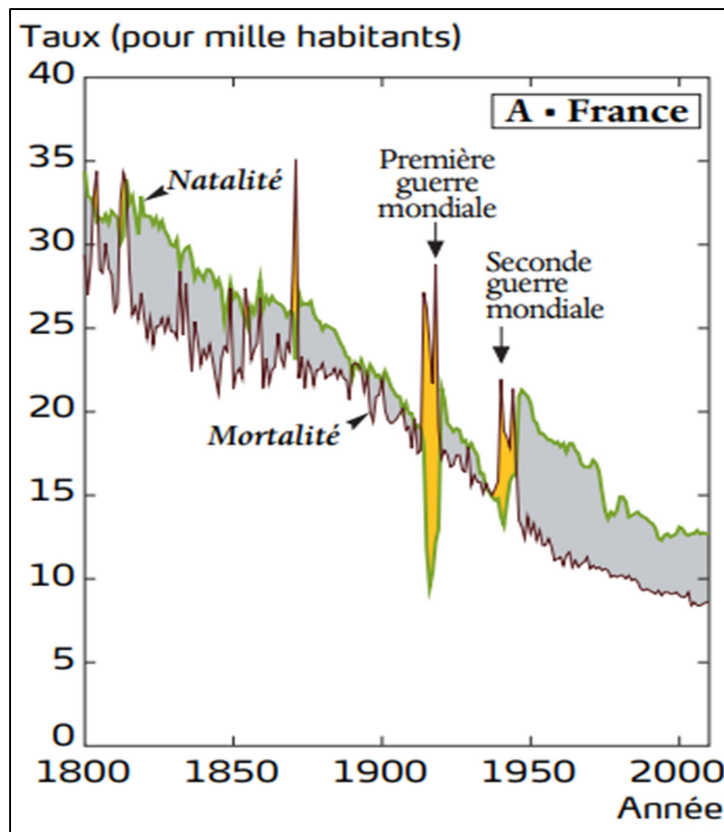


Figure 7 : évolution du taux de natalité et du taux de mortalité en France entre 1800 et 2010 (source : Pison 2012)

Si en effet, on peut constater sur le graphique ci-dessus une baisse continue de la natalité et de la mortalité sur la période 1800-1939 ; on remarque également que la natalité s'est au contraire accrue dans les années 1950, ce qui correspond au phénomène de baby-boom d'après-guerre, tandis que la baisse de mortalité ralentissait sa diminution. Cela semble également mal correspondre au modèle proposé par Galor qui définissait une période Malthusienne, Post-malthusienne et un régime moderne de croissance, la période post-malthusienne étant caractérisée par une forte croissance démographique contrairement au régime moderne de croissance censé démarrer dans les années 1990 (Galor 2000).

La question se pose concernant la base de données à choisir pour tester l'état de la relation entre énergie et population. En effet, la base de données corrigée permet de s'affranchir d'un certain nombre de chocs « artificiels » qui pourraient par exemple parasiter l'établissement d'un lien de causalité. Cependant, nous avons fait le choix d'utiliser la base de données brutes principalement pour deux raisons. D'une part notre méthode de correction comporte elle-même des biais, puisqu'elle suppose un état démographique statique des territoires adjoints ou cédés. Cela interroge donc sur la pertinence d'utiliser une telle base de donnée pour un test de

causalité. D'autre part les chocs territoriaux artificiels pourraient avoir au contraire le mérite de révéler une causalité entre nos deux variables. Ainsi, si l'énergie cause la population, un ajout « artificiel » de population pourrait conduire à une plus faible hausse de la démographie, le stock de matière première énergétique étant alors à répartir sur une population plus importante. A l'inverse si la population causait la consommation d'énergie, un ajout « artificiel » de population devrait conduire à augmenter la production nationale et la consommation d'énergie. Ces différents éléments expliquent donc notre choix pour la base de données brutes concernant la population.

2. Les données énergétiques

2.1. Production et consommation de charbon

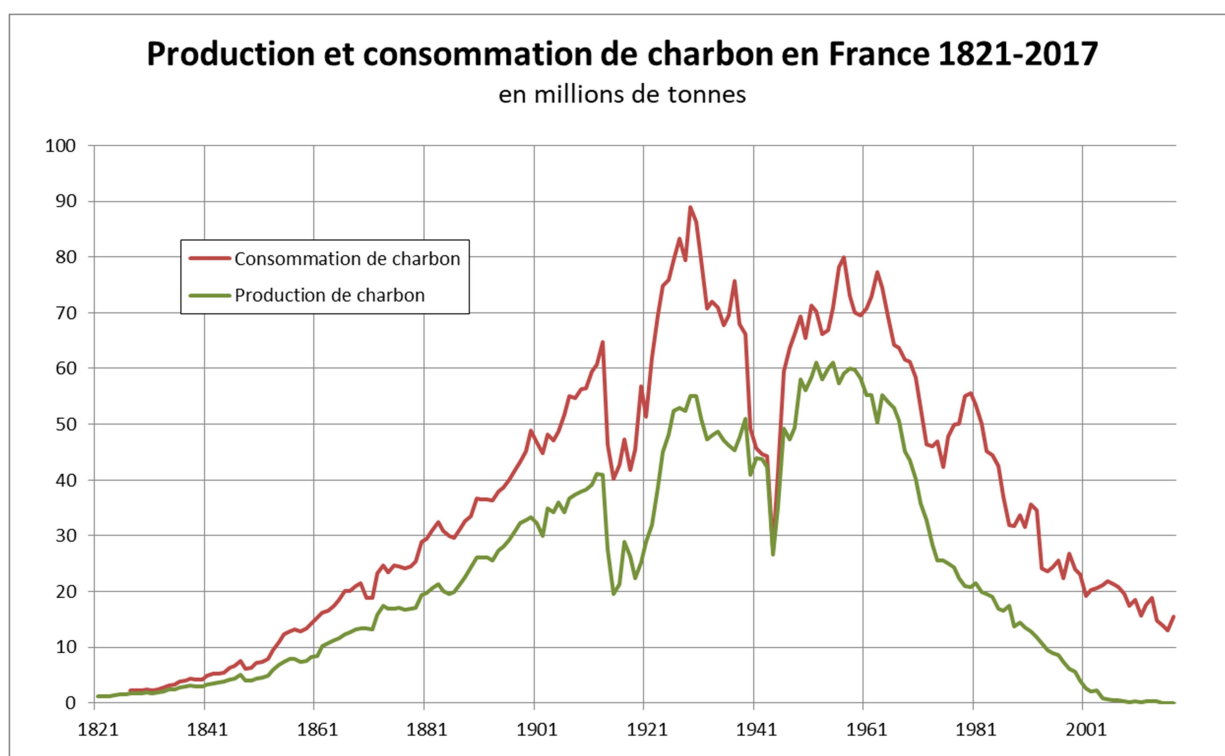


Figure 8 : Production et Consommation de charbon (sources diverses)

La figure 6 montre l'état de la production de charbon en France de 1821 à 2017 ainsi que la consommation de 1827 à 2017 avec une absence de données de 2003 à 2010.

Bien que l'annuaire de la France ait été publié jusqu'en 2007, les données concernant le charbon n'y figurent plus à partir de 2003. Or l'unité des données jusque-là collectées étant la tonne, il n'a pas été possible de recourir au *BP Statistical Review of World Energy* qui donne ses chiffres de consommations et de production de charbon en millions de tonnes équivalents pétrole (Mtep). Les données de 2003 à 2017 ont donc été récupérées pour ce qui concerne la partie production via le site *Perspective Monde* de l'Ecole de politique Appliquée de l'Université de Sherbrooke, Québec. Les données de consommation ont pu être trouvées en tonnes pour la période 2003-2017 en se basant sur les données fournies dans le *Bilan énergétique de la France* et les *Chiffres clés de l'énergie* publiées par le Commissariat général au développement durable.

A partir de ces données on peut voir que la production de charbon française a fortement ralenti sa croissance à partir du milieu des années 1920 avant de connaître un pic en 1962 à 61 029 milliers de tonnes. La consommation française de charbon a été constamment supérieure à la production française. En effet, la faible dotation naturelle de la France en ressources charbonnières a fait du pays un acteur structurellement importateur, aussi loin que peuvent remonter nos données. Le pic de consommation de charbon en France se situe en 1929 à 88 967 milliers de tonnes soit 33 ans avant son pic de production. Si le pic de consommation et de production ont été aussi espacés dans le temps, c'est sans doute dû au pic de production charbonnier du Royaume Uni, un des principaux fournisseurs de la France en combustible et qui s'est produit en 1913. La baisse de demande en combustible côté français est sans doute moins en cause puisque la demande a été assez forte pour encourager une hausse de la production nationale de charbon jusqu'à son pic en 1962.

2.2. Consommation de pétrole

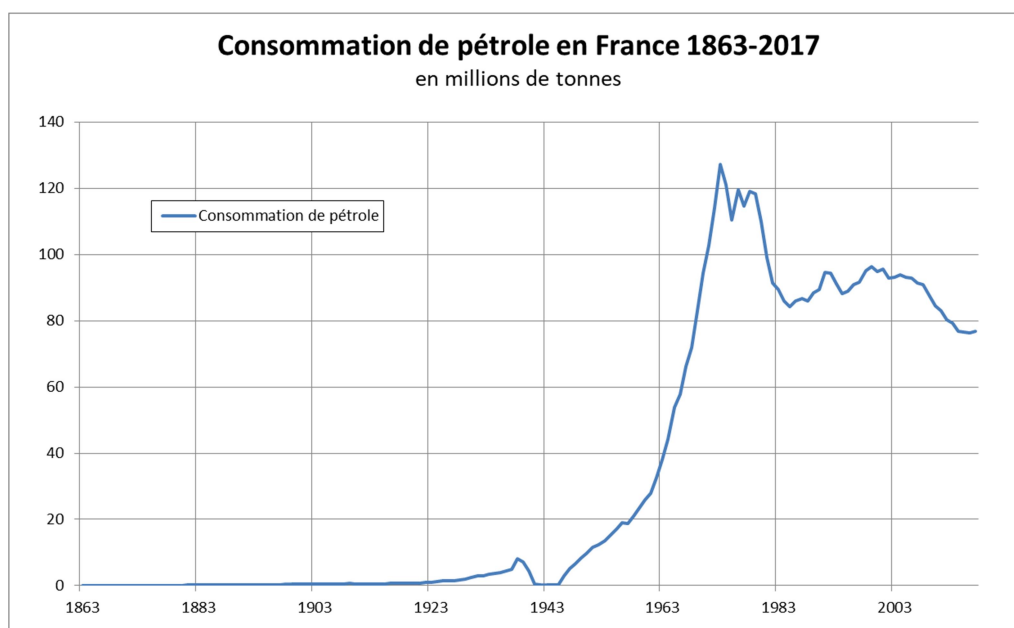


Figure 9 : Consommation de pétrole (source Annuaire Statistique & BP)

Sur la figure 9 on peut voir les données qui ont été collectées concernant la consommation de pétrole en France depuis 1863. Sa consommation reste marginale jusqu'au début des années 1920 où un petit décollage semble s'opérer, notamment dû au développement du transport automobile. Néanmoins la réelle envolée de la consommation de ce type d'énergie se produit à la fin de la Seconde Guerre Mondiale. On peut également remarquer que la consommation de pétrole en France a connu un pic en 1973, année du premier pic pétrolier, avec une valeur de 127,3 millions de tonnes de pétrole consommé. Depuis cette date, la consommation est en fort recul, atteignant 76,9 millions de tonnes en 2017.

Les données pour ce combustible proviennent de l'Annuaire Statistique de la France jusqu'en 1965 puis du *BP Statistical Review of World Energy* pour le reste. En effet, en exprimant ses données en équivalent pétrole, nous pouvons les intégrer à notre base de données également exprimée en tonnes de pétrole. Il faut également souligner que l'Annuaire Statistique de la France donne les données de consommation de pétrole en milliers de quintaux. Pour les convertir en milliers de tonnes et sachant que 1 quintal est équivalent à 0,1 tonne, il a suffi de multiplier ces données par 1/10.

2.3. Production d'hydroélectricité :

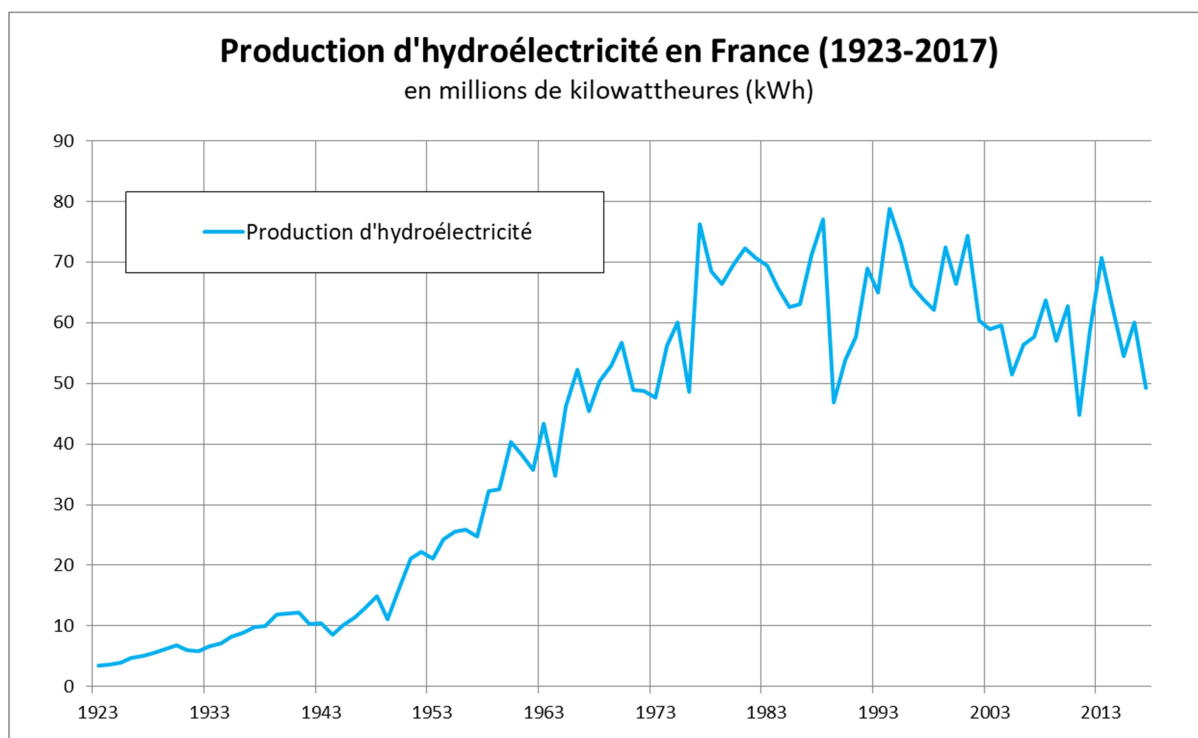


Figure 10 : Production d'hydroélectricité (source : Annuaire Statistique & BP)

La troisième source d'énergie disponible par ordre d'apparition dans l'annuaire statistique de la France est l'énergie hydroélectrique, surnommée à l'origine la « houille blanche », selon l'expression de l'industriel Aristide Bergès (Corniou 2018). Celle-ci est reportée à partir des années 1920, avec la mise en route de grands programmes gouvernementaux de construction de barrages. Les données à partir de 1965 sont issues du *BP statistical Review of world Energy*. La conduite de la Première Guerre Mondiale avait révélé la forte dépendance de la France à son industrie charbonnière dont les plus grands gisements situés dans le Nord de la France avaient été occupés par l'Allemagne ou mis en arrêt. L'énergie hydroélectrique permet de générer de l'électricité à partir d'une source renouvelable.

Une première loi entre en application le 16 octobre 1919 faisant de l'énergie des marées des lacs et des cours d'eau une propriété d'état. En d'autres termes, l'aménagement de barrages hydroélectriques se retrouvait nationalisé. La mise en place d'usines hydroélectriques avait démarré dès 1890 mais le réel élan est donné par cette loi, qui débouche par exemple sur la mise en route des barrages de Eguzon en 1926, Coindre en 1927 et Sarrans en 1932. En retard par rapport aux autres puissances industrielles, la France parvient à rattraper son retard par des

transferts technologiques et des investissements massifs (Bordes 2010) et devient en 1937 le 4^e producteur mondial d'énergie hydro-électrique devant la Suisse mais derrière les Etats-Unis, le Canada et l'Italie.

La politique de développement du potentiel hydroélectrique se poursuit après la Seconde Guerre Mondiale. Elle est notamment une des priorités du plan Monnet (1946-1950). Entre 1945 et 1960, ce ne sont pas moins de 120 grands barrages qui sont construits et inaugurés (Corniou 2018). Cependant on constate à partir du milieu des années 1970 que la production hydroélectrique stagne, voir diminue légèrement en tendance jusqu'à aujourd'hui. Les fortes variations de production d'années en années sont autant dues à l'évolution des précipitations qui jouent sur le niveau de remplissage des barrages, que de la mission d'équilibrage du réseau électrique. En effet, les barrages interviennent pour faire face aux pointes de consommation ou d'indisponibilité d'autres moyens de production (Laleu 2005). L'arrêt de la hausse de la production hydroélectrique peut s'expliquer par le fait que la France avait déjà exploité en 2011 environ 50% de son potentiel hydroélectrique techniquement exploitable et 72% de son potentiel économiquement exploitable selon le Conseil Mondial de l'énergie. En d'autres termes, les seuls emplacements restant capables d'accueillir une installation hydroélectrique sont les emplacements les plus difficiles d'accès et qui donc renchériraient le coût de l'énergie produite. Des considérations environnementales peuvent également être une des causes de l'arrêt de la construction de nouveaux barrages, étant donné que ces derniers nécessitent la destruction de large espace pour le remplissage des lacs de barrage.

2.4. Consommation de gaz naturel :

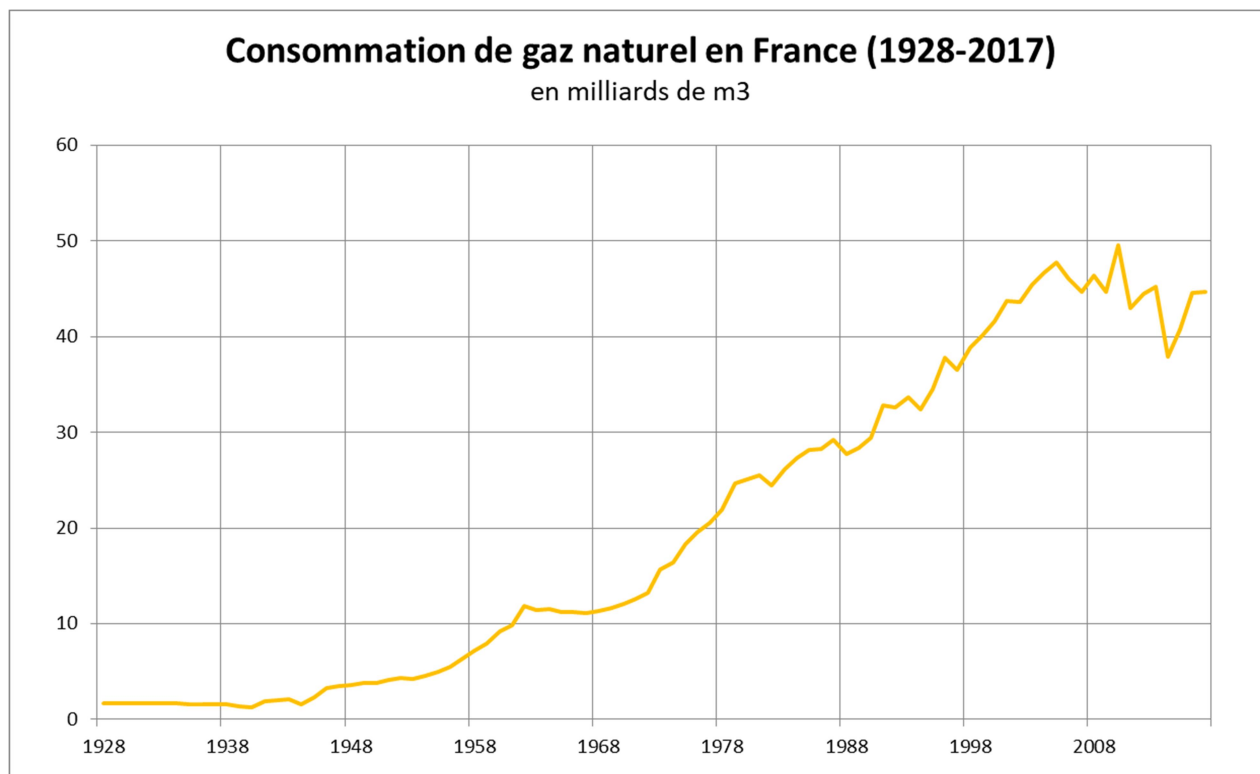


Figure 11 : Consommation de gaz naturel en France (source : Annuaire Statistique & BP)

Le gaz est utilisé depuis le début du XIX^e siècle dans les grandes villes européennes principalement pour l'éclairage puis la cuisson, le chauffage et la production d'électricité. Avant la Seconde Guerre Mondiale le gaz naturel consommé est principalement issu du charbon, le « gaz de houille » qui est par exemple un sous-produit de la fabrication de coke (un élément nécessaire à la sidérurgie). En effet, le premier gisement de gaz naturel appelé *Saint Marcet* en Haute-Garonne (Georges 1958), c'est-à-dire où le gaz est extrait directement du sous-sol n'est mis en production qu'en 1939. Après-guerre, la nationalisation de la quasi-totalité des installations gazières (Veyret 1961) permet la constitution d'un réseau national de distribution afin d'acheminer le gaz naturel issu de gisements d'hydrocarbures nationaux (gisement de Lacq en Aquitaine) ou étrangers à peu près partout en France.

Les données constituant la figure 11 proviennent de l'Annuaire Statistique entre 1928 et 1964 et du BP Statistical Review of World Energy à partir de 1965 où on peut trouver des chiffres de consommation exprimés en m³. Le gaz en 2017 était principalement utilisé pour les besoins

de chauffage avec 81% des usages et la production électrique avec 16% des usages (Les chiffres clés de l'énergie 2019). On constate que la consommation française se stabilise à partir de 2005 autour de 45 milliards de m³ par an. De manière similaire au pic de consommation charbonnier en 1929, on peut suspecter que le pic de production de gaz naturel survenu en Europe en 2004 (Durand 2018, p. 131) ait eu un impact majeur. En effet, du fait de son état chimique, le gaz est malcommode à transporter sur de longue distance. Le transport par oléoduc ou par liquéfaction du gaz ne peut donc que remplacer qu'imparfaitement et avec surcoût le gaz produit « localement ».

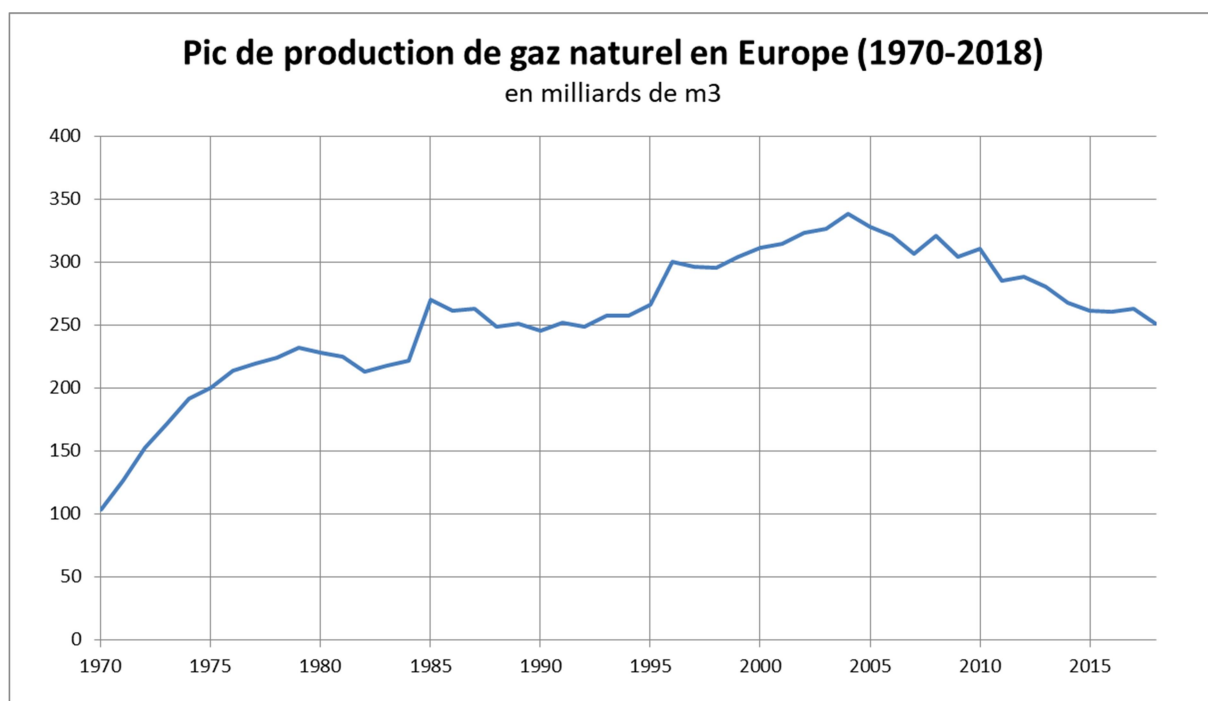


Figure 12 : Pic de production de gaz naturel en Europe (source : BP)

2.5. Production électronucléaire :

La France générait en 2017 un peu moins de 72% de son électricité grâce à la technologie nucléaire (EDF 2018). En matière de part relative dans la production électrique totale, la France est de loin le premier consommateur de cette source d'énergie pour ses besoins électriques, parmi les grands pays industrialisés comme les Etats-Unis (20%), la Corée du Sud (27%) ou la Suède (40%). En valeur absolue, la France est le deuxième producteur d'électricité issue du nucléaire avec 379 TWh généré en 2017 contre 805 TWh pour les Etats-Unis et 248 TWh pour la Chine à la 3^e marche du podium.

Les données du graphique ci-dessous sont extraites de l'*Annuaire Statistique* entre 1959 et 1964 puis du *BP Statistical Review of World Energy*. Les chiffres sont exprimés en wattheures dans ces deux sources. On peut voir que la production d'électricité d'origine nucléaire s'est fortement accélérée au cours des années 1970 en raison des choc pétroliers des 1973 et 1979. En effet, pour diminuer la dépendance de la France au pétrole, le gouvernement de Pierre Messmer décide, sous la présidence de Georges Pompidou, d'accélérer le programme de construction de réacteurs nucléaires. Ce plan connu sous le nom de « plan Messmer » est adopté en mars 1974. D'un montant de 100 milliards de francs, il aboutit à la construction de 12 000 MW entre 1976 et 1977 de puissance nucléaire supplémentaire et de 5000 MW par an de 1977 à 1981 (Guillaumat 1987).

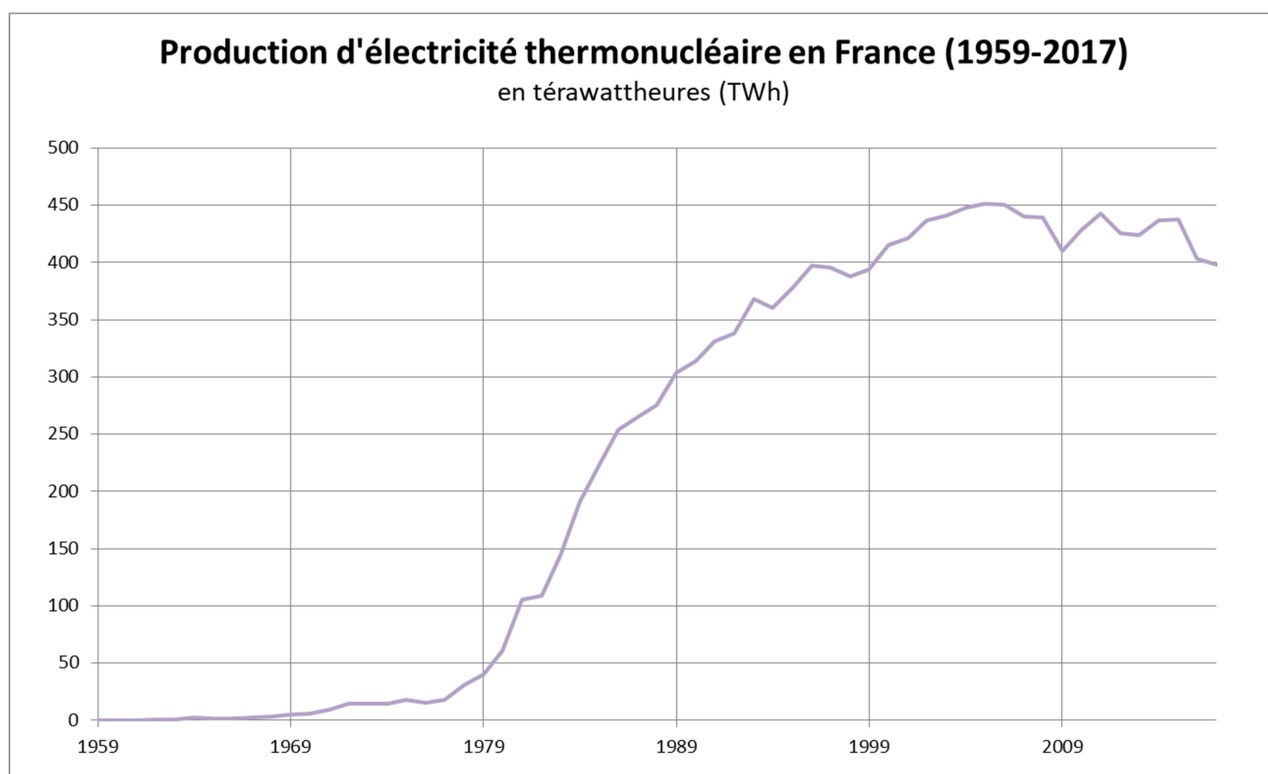
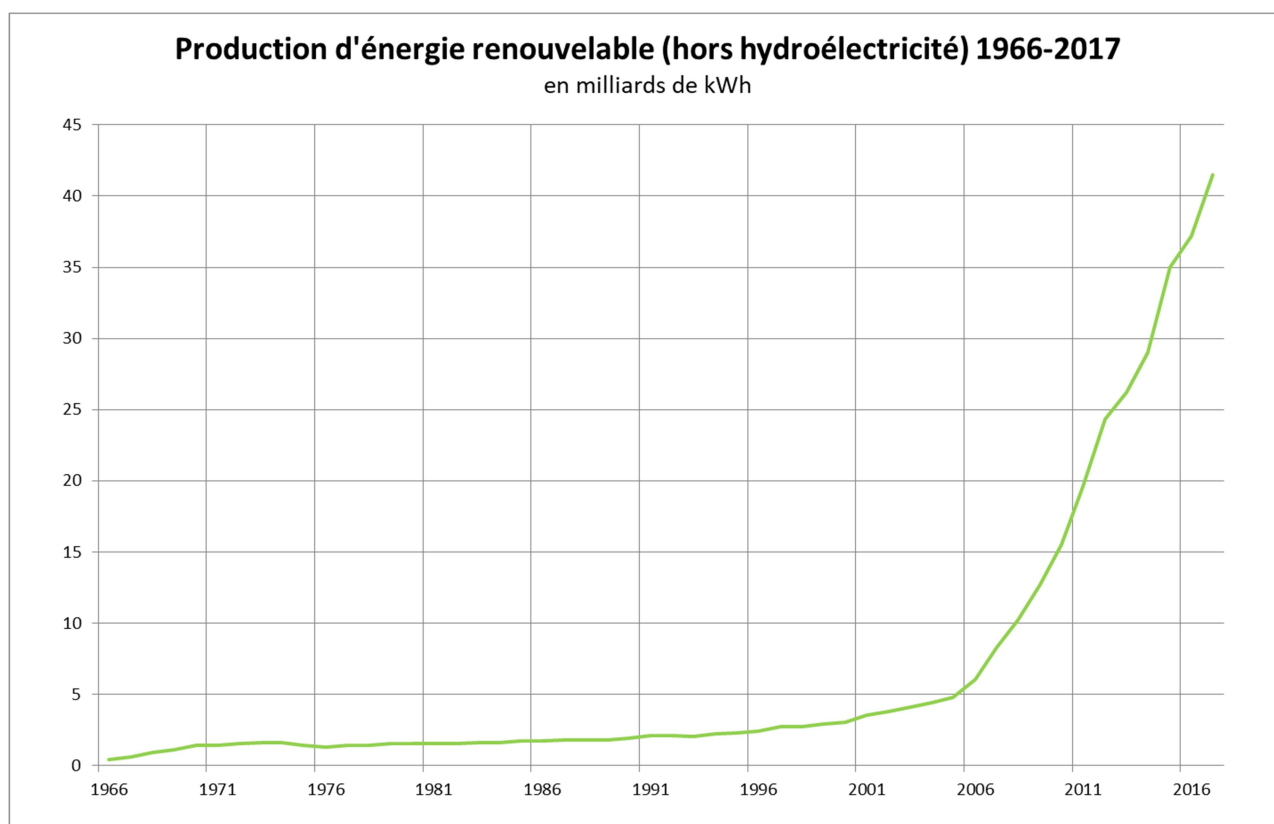


Figure 13 : Production thermonucléaire en France (source Annuaire Statistique & BP)

La dernière centrale mise en service est la centrale nucléaire de Civaux (département de la Vienne) en 2002 (Cours des comptes 2012, p.17), ce qui explique la stagnation de la production d'énergie électronucléaire depuis cette date. La centrale nucléaire de type EPR (European Pressurised Reactor) en construction à Flamanville depuis décembre 2007 ne devrait pas entrer en exploitation avant 2022.

2.6. Production d'électricité renouvelable :



La production d'énergie renouvelable est donnée dans le *BP Statistical Review* à partir de 1966. C'est de cette source qu'est extrait le graphique ci-dessus. Cette électricité renouvelable est issue de la production des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, de la géothermie (présente notamment en Alsace et en Guadeloupe), et de la combustion de biomasse (copeaux de bois ou déchets agricoles). Cette source d'énergie est en forte croissance depuis la fin des années 2000 avec le développement de l'énergie solaire et éolienne permis par une politique de subvention de ce type d'énergie. Néanmoins elles restent encore une source d'énergie marginale au regard de la consommation totale (2% en 2017).

3. Mise en relation des données

A présent que nous avons pu nous familiariser avec nos variables principales, il nous reste à les mettre en relation les unes avec les autres. Tout d'abord, il va nous falloir être en mesure

d'additionner et de comparer les sources d'énergie entre elles. Or nous avons vu que les unités utilisées précédemment pouvaient varier de la tonne de pétrole (unité de poids) au kWh (unité d'énergie) en passant par les m³ (unité de volumes). Afin d'harmoniser le tout nous avons converti ces unités en une unité commune.

Nous avons choisi de nous reposer sur la tonne équivalent pétrole (tep) et ses déclinaisons (ktep, Mtep... respectivement pour mille et 1 million de tep). Cette unité est utilisée dans la plupart des grands rapports internationaux concernant les questions énergétiques (AIE, BP, EIA...). L'Annuaire statistique de la France a pour sa part commencé à exprimer les différentes sources d'énergies en « tep » à partir des années 1970, la substituant ainsi à la « tec » (tonnes équivalent charbon). Une des seules institutions à toujours utiliser l'unité « tec » est le Bureau National des statistiques de Chine, sans doute en raison de la place prééminente qu'occupe le charbon dans le mix énergétique de ce pays.

Le rapport annuel *BP statistical Review of World energy* fournit une table de conversion entre les différentes unités que nous avons utilisées jusqu'ici. Une telle conversion est possible si l'on suppose qu'il existe une densité énergétique moyenne pour chaque type d'unité : un m³ de gaz naturel (CH₄) contiendra une quantité d'énergie similaire en tout temps et en tout lieu, une tonne de charbon ou une tonne de pétrole représentative.

	à			
de	tonne de charbon	tonne de pétrole	kWh	m3 de gaz
tonne de charbon	1	0,66667		
tonne de pétrole	1,5	1	12 000	1163
kWh		0,00008	1	
m3 de gaz		0,00086		1

Tableau 2 : table de conversion entre différentes unités (source BP)

Ainsi selon BP, une tonne standard de pétrole équivaut à 1,5 tonne de charbon standard. Cela illustre le fait qu'une tonne de pétrole est beaucoup plus énergétique qu'une tonne de charbon.

Dit autrement, la « qualité énergétique » du pétrole est plus grande à poids équivalent. C'est cette qualité qui a notamment permis la « révolution des transports » qu'a été l'automobile.

Cependant, cette simplification du réel omet que la qualité d'un champ de pétrole varie d'un gisement à un autre. De même il existe différentes qualités de charbon (anthracite, sub-bitumineux, lignite...) qui possèdent des densités énergétiques très différentes. De même un m³ de gaz naturel peut-être plus ou moins énergétique en fonction de la quantité de molécules plus lourdes qu'il contient (éthane, propane...).

Malgré ces imperfections, nous avons néanmoins choisi de convertir nos données selon les valeurs proposées par BP. Nous estimons en effet que cette conversion nous rapproche davantage de la réalité physique qu'elle ne nous en éloigne.

La conversion réalisée nous montre que le charbon reste l'énergie dominante jusqu'à la fin des années 1960, mais que le « moteur de la croissance » de la consommation énergétique est le pétrole sur la période couvrant les années post-Seconde Guerre Mondiale jusqu'aux chocs pétroliers des années 1970. La consommation totale d'énergie connaît en 1979 un premier pic à environ 185 Mtep. Face à l'envolée des prix du pétrole à la suite des chocs pétroliers, la France, et plus largement les pays industrialisés, ont choisi de favoriser l'efficacité énergétique (produire plus avec moins d'énergie) et diversifier leur mix énergétique. En France, le développement de l'utilisation du gaz naturel et de l'énergie nucléaire permet, au pays de dépasser en 1999 son niveau record de consommation d'énergie de 1979. Un nouveau pic est atteint en 2005 à 191 Mtep. Cependant, ce nouveau record n'est que très provisoire, la consommation d'énergie s'effondrant à nouveau jusqu'à aujourd'hui. En 2017, le niveau de consommation est équivalent à celui de 1990. Le développement des nouvelles énergies renouvelables, principalement l'éolien et le solaire, ne parvient pour l'instant pas à compenser le déclin des autres formes d'énergie.

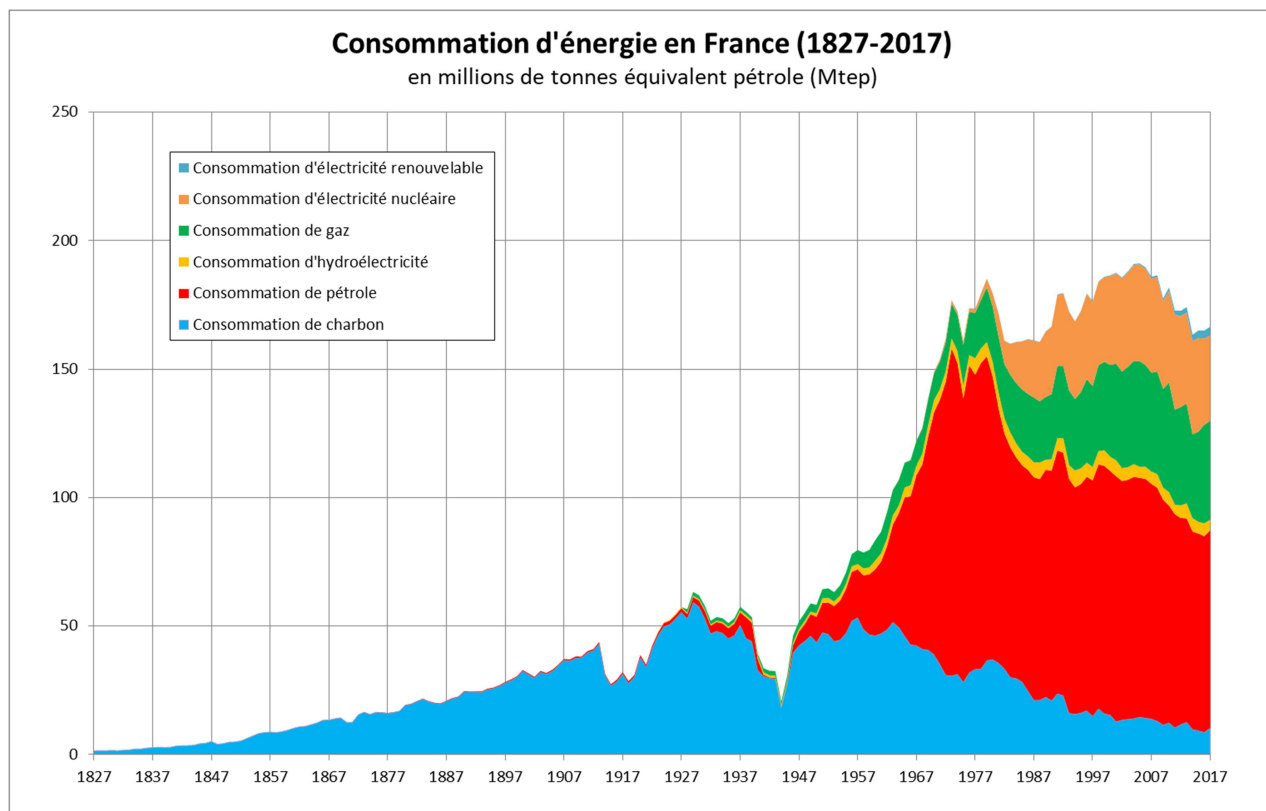


Figure 14 : Consommation d'énergie en France par type d'énergie

L'idée d'un lien entre énergie et population n'est pas totalement saugrenue si l'on se réfère à la littérature sur le sujet. En effet, de nombreux travaux économiques ont lié une partie de la hausse de la consommation d'énergie à long terme à la hausse de la population. Holdren en 1991 estimait ainsi que la croissance de la population mondiale depuis 1850 était à elle seule responsable de 52% de la hausse de la consommation en énergie. Aux États-Unis cette part aurait même été de 66%.

Dans le cas de la France sur la période 1827-2017, on peut voir sur la figure 15 que population et énergie sont fortement corrélées linéairement, avec un R^2 de 0,9484. Si on utilise une courbe de tendance exponentielle cette corrélation est très légèrement améliorée avec un R^2 de 0,959. En d'autres termes, les données semblent mettre en évidence un lien entre la population et la consommation d'énergie.

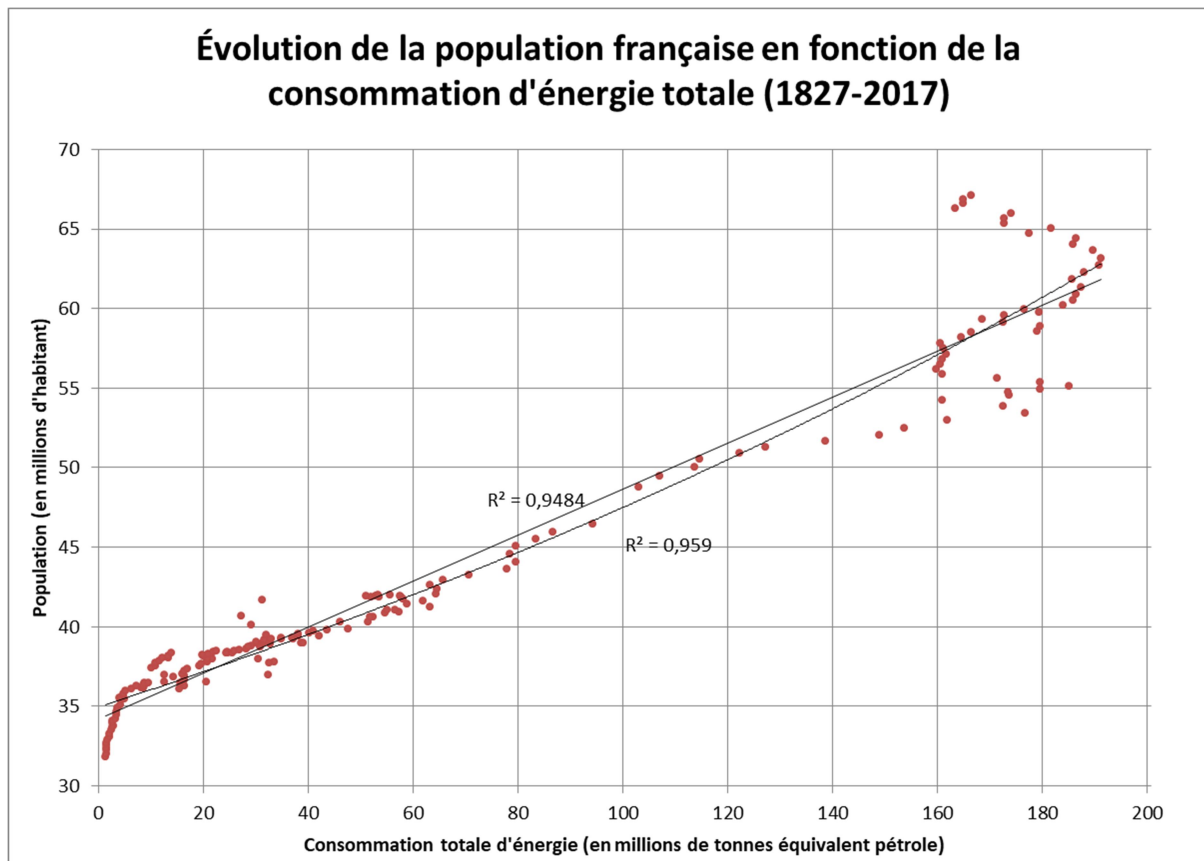


Figure 15 : évolution de la population française en fonction de la consommation d'énergie

Si on s'attarde sur la figure ci-dessus, on s'aperçoit également que les données s'organisent selon un schéma de couches « successives ». Ces couches semblent correspondre à l'arrivée de sources d'énergie nouvelles. Ainsi l'utilisation du charbon se traduit par une augmentation forte de la population entre 0 et 20 Mtep et une augmentation plus ralentie entre 20 et 40 Mtep. Cette organisation logarithmique des points est contrecarrée par l'arrivée du pétrole visible autour de 60 Mtep. Dans un premier temps, la population reste stable alors que la consommation totale d'énergie diminue légèrement, ce qui forme une sorte de crosse vers la gauche. Puis la population reprend un rythme de croissance plus classique, en augmentant de concert avec la consommation d'énergie. Ce schéma se répète avec l'arrivée de la consommation massive de gaz puis du nucléaire.

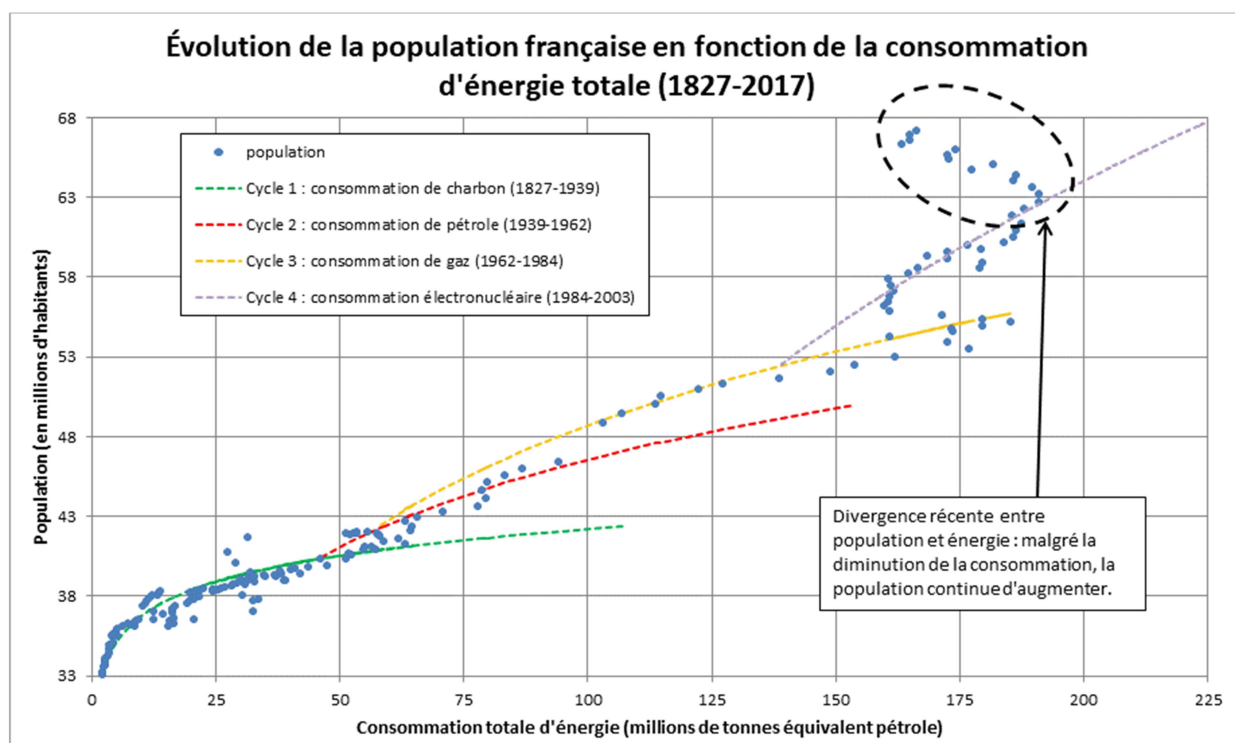


Figure 16 : différents cycles démographiques peut-être lié à l'apparition de sources d'énergie nouvelles

Pour clarifier cette représentation nous avons représenté ci-dessus les différents cycles énergétiques qui semblent correspondre à autant de « bonds » démographiques. Les périodes ont été choisies lorsque l'énergie majoritaire représente moins de 87% du total de l'énergie consommée et que sa part reste durablement inférieure à 10%. Lorsque tel est le cas on ajoute à l'énergie dominante, la seconde forme d'énergie la plus abondante. Lorsque à nouveau la somme des énergies marginales est supérieure à 13% et à 10% sur longue période, on ajoute l'énergie marginale la plus importante au total des énergies prises en compte. En procédant de la sorte nous avons défini 4 périodes. Celle allant de 1827 à 1939 (Seconde Guerre Mondiale exclue) où le charbon est l'énergie motrice. La période 1946-1962 est caractérisée par une forte dynamique du pétrole. Entre 1963 et 1984 c'est le gaz naturel qui prend son envol, suivi par l'énergie nucléaire en 1984.

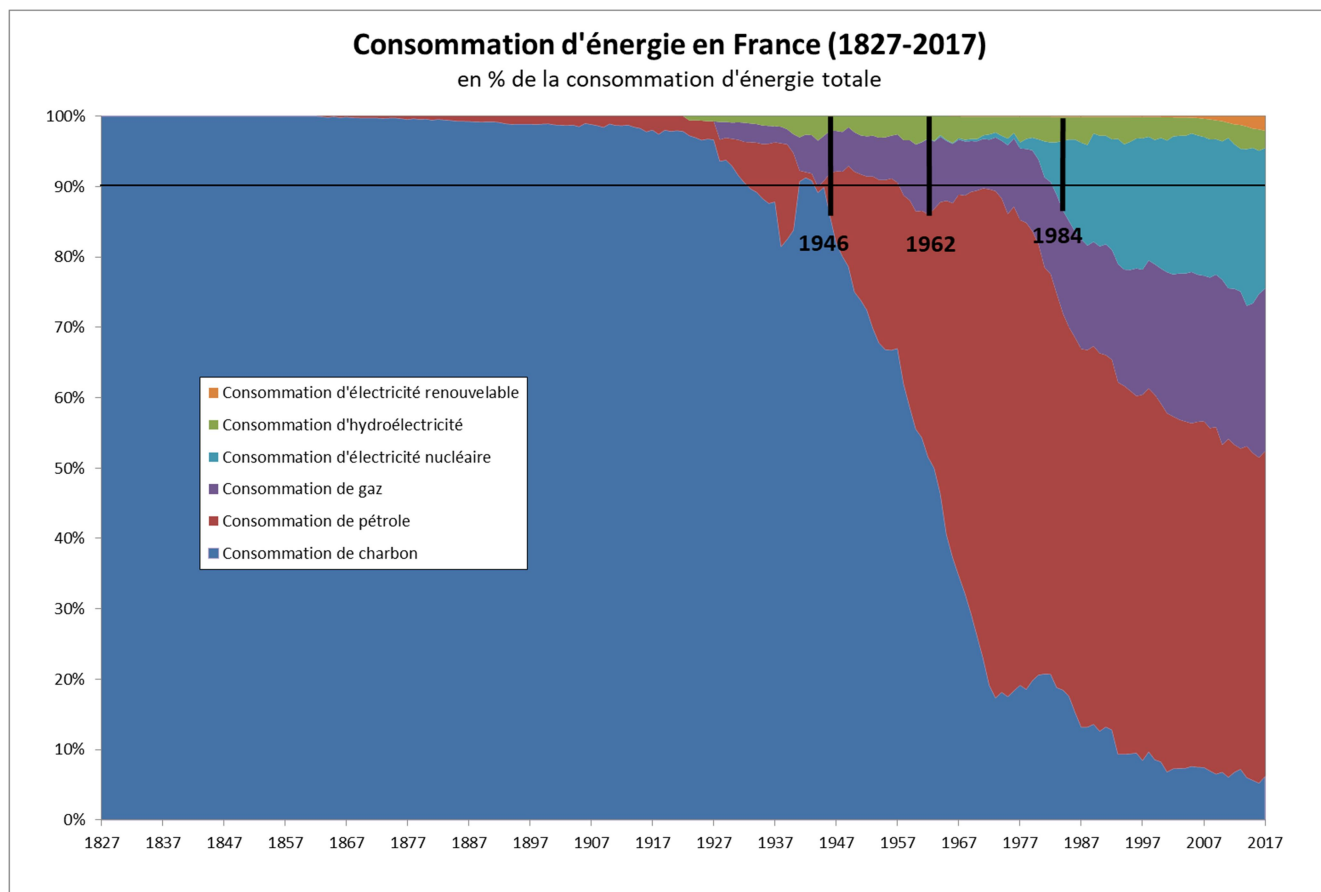


Figure 17 : décomposition de la consommation française d'énergie (en %)

On remarque aussi à partir des années 1990 et 2000 une divergence entre consommation d'énergie et population. En effet, la population continue d'augmenter malgré la stagnation puis le déclin de la consommation d'énergie.

A priori, une telle évolution devrait discréditer l'idée d'un lien positif entre population et énergie. Néanmoins, à l'instar des émissions de CO₂, il est nécessaire de prendre en compte l'énergie « importée » notamment via les importations de différentes marchandises (voir figure 18 ci-dessous). En effet, une nouvelle page de la mondialisation des échanges s'ouvre dans les années 1990, avec au niveau international l'ouverture de la Chine Populaire, et au niveau européen la signature de l'accord de Maastricht de 1992 favorisant le libre-échange (article 73 B). Ce n'est cependant pas l'objet de ce mémoire de recherche.

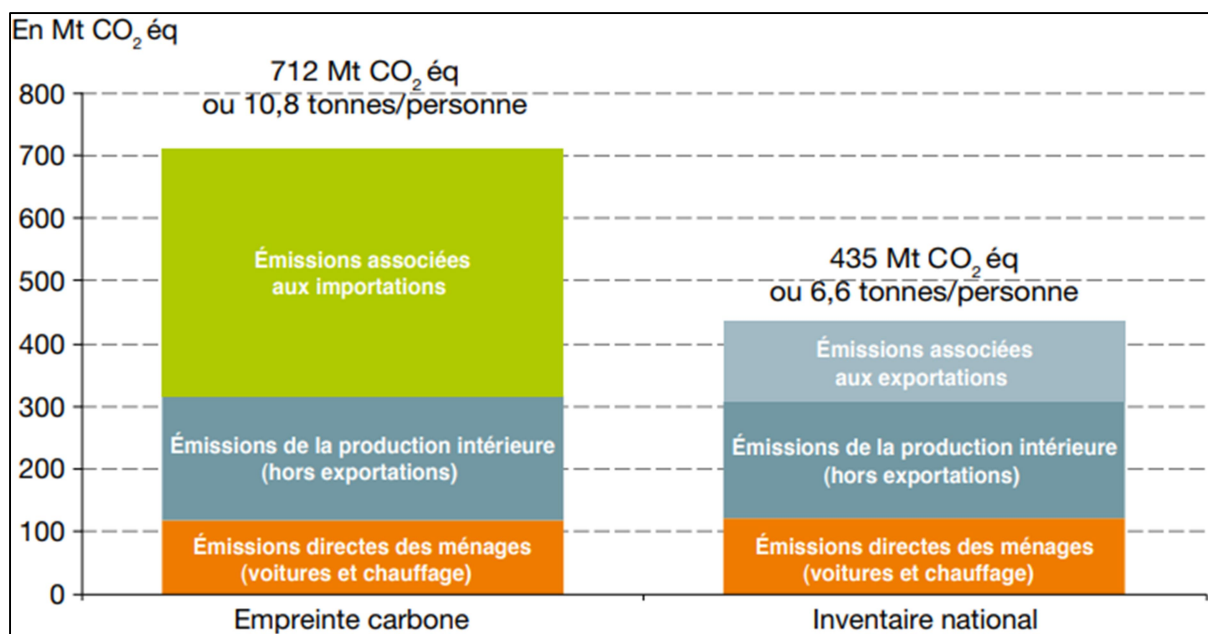


Figure 18 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre entre l'empreinte carbone et l'inventaire national en 2014 (source : Commissariat général au développement durable)

On peut voir en effet, que lorsque l'on tient compte des émissions de CO₂ « importées », l'empreinte carbone d'un français représente 10,8 tonnes d'équivalent CO₂ contre seulement 6,6 tonnes si l'on se contente de mesurer les émissions sur le sol national. Les émissions de CO₂ peuvent être considérées comme des résidus de combustion, en d'autres termes le CO₂ est émis lors de l'utilisation d'une énergie fossile. Mesurer l'empreinte carbone de la France revient donc à mesurer si l'on consomme ou non de l'énergie de manière indirecte via nos importations de marchandises et de matières premières.

III. Méthodologie :

Notre travail consiste à tester les interactions et la causalité entre la variable « population » et la variable « énergie ».

1. Description du modèle VAR

Pour cela nous utilisons la méthode des vecteurs autorégressifs (VAR method) développée dans les années 1980 par Christopher Sims (Sims 1980) qui permet de construire un modèle

où les variables évoluent en fonction de leurs valeurs passées et des valeurs passées des autres variables du modèle.

Le modèle VAR s'écrit sous la forme :

$$X_t = \sum_{i=1}^p A_i X_{t-i} + \varepsilon_t$$

Où :

- X représente une matrice de variables, contenant à la fois la variable explicative et la variable expliquée au temps t.
- p est le nombre de décalage optimal du modèle
- A représente la matrice des coefficients associés à nos variables
- ε représente une matrice des « erreurs » du modèle par rapport à la réalité, aussi appelés « résidus » de l'équation.

De manière plus concrète, un modèle VAR à deux variables avec un retard de 2 périodes peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{array}{c} \boxed{\text{Retard 1}} \quad \boxed{\text{Retard 2}} \\ \underbrace{\hspace{1.5cm}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}} \\ \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t-1} \\ Y_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t-2} \\ Y_{t-2} \end{bmatrix} + [\varepsilon_t] \end{array}$$

Le modèle VAR ci-dessus comporte donc deux variables, X et Y. A_i et C_i sont les coefficients associés à la variable X, A_i représentant les coefficients relatifs à X présents dans l'équation de X et C_i le coefficient relatif à X dans l'équation de Y. Le nombre de retards correspond au nombre de valeurs passées des deux variables qu'il est nécessaire de prendre en compte afin de minimiser les résidus des équations du modèle par rapport aux évolutions réelles.

En d'autres termes, le modèle VAR permet de décrire la réalité en établissant un système d'équations entre plusieurs variables et ainsi capturer des relations d'interdépendances temporelles. L'approche VAR a été appliquée pour la première fois à au champ de la démographie historique par Eckstein et al en 1984.

Le modèle VAR est appliqué à nos données de 1827 à 2017 concernant le cas français.

2. Conditions nécessaires pour le modèle VAR et le test de Granger

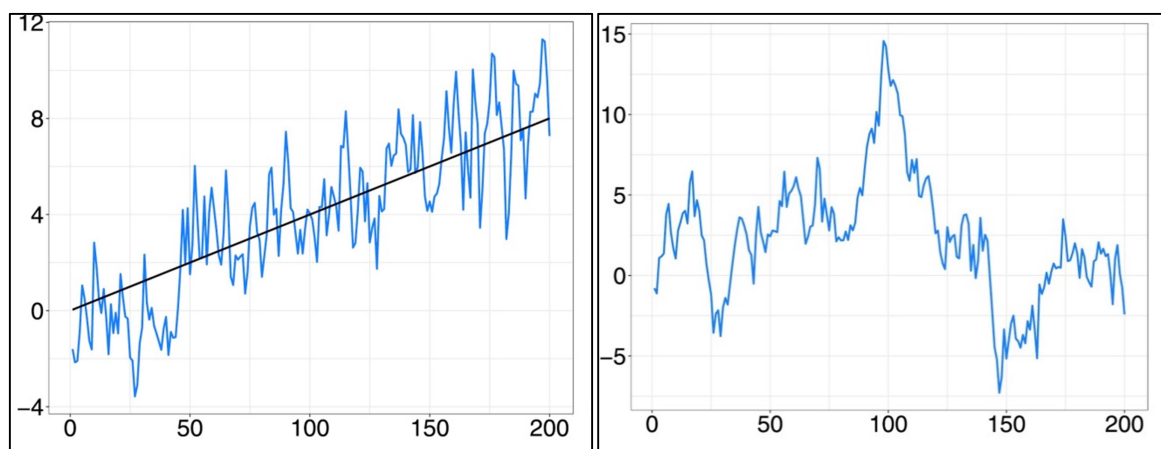
Un des avantages de la méthodologie VAR est qu'elle nous permet de considérer les variables sans *a priori* sur leur endogénéité/exogénéité. Elle offre également la possibilité de tester des relations entre nos variables grâce au test de causalité de Granger. En effet, l'analyse de Granger est une approche non-structurelle qui vise à identifier les effets causaux d'une variable sur une autre, sans faire d'hypothèse précise sur le mécanisme à l'œuvre dans cette causalité mais en s'appuyant sur l'information contenue dans les données (Roux 2015). Cette approche est ainsi qualifiée parfois d'« a théorique ».

Pour pouvoir utiliser un modèle VAR il est nécessaire de s'assurer qu'un certain nombre de pré conditions sont remplies. Tout d'abord, il est nécessaire de travailler avec des variables stationnaires, c'est-à-dire dont tous les moments sont indépendants de l'origine du temps.

Pour tester la stationnarité de nos séries nous nous appuyons sur les tests de racine unitaire développés par Elliott et al. en 1996 (Elliott, Rothenberg and Stock (ERS) Unit Root Tests) considérés comme plus efficaces (Salanié 1999, Jaoul-Grammare et Perrin, 2017) que les tests classiques de Dickey-Fuller de 1979.

On distingue deux types de non stationnarité. Tout d'abord la non-stationnarité de type TS (Trend Stationary Process) qui indique que la série est affectée par une tendance déterministe c'est-à-dire affectée par une tendance temporelle à la hausse ou à la baisse (ligne noire du graphique ci-dessous). Le deuxième type de non-stationnarité est le processus de type DS (Difference Stationary Process) caractérisé par un comportement aléatoire de la série, non affecté par le temps. Le premier type de non-stationnarité peut-être stationnarisé par écart à la

tendance temporelle identifiée, tandis que le second est stationnarisé à l'aide de la méthode des différences premières.



**Figure 19 : Exemple d'un processus TS (à droite) et d'un processus DS (à gauche),
source Salles 2018**

Dans le cas d'un processus DS, il est parfois nécessaire de d'utiliser la méthode des différences première un certain nombre de fois avant d'obtenir une série stationnaire. Dans ce cas le nombre de « filtres d'intégrations » appliqué à la série d'origine définie « l'ordre d'intégration » de la variable. Ainsi une variable intégrée d'ordre 2 aura subi une première stationnarisation par différence première, puis la nouvelle série ainsi obtenue aura à son tour subi une nouvelle stationnarisation par la même méthode.

Après cette étape de stationnarisation, il est nécessaire de déterminer le nombre de retards optimaux du modèle. On dispose pour cela d'un certain nombre de critères d'information (FPE, AIC, BIC, HQC...) généralement basés sur la maximisation du logarithme de la fonction de « log-vraisemblance » (Jaoul 2004). Le modèle retenu est celui disposant du « retard » associé à la valeur minimale du critère considéré. En revanche la littérature économique est moins claire sur le critère à privilégier pour déterminer notre retard optimal. En effet, il n'y a pas de hiérarchie entre ces critères, qui possèdent tous des qualités de consistance et d'efficacité (Deniau 1992). Certains critères peuvent être préférés selon que la série étudiée comporte un nombre élevé ou faible d'observations (Liew 2004). Cependant, nous nous inspirerons ici, de la méthode développée par Shakouri et Menjah en 2008, consistant à choisir le modèle qui maximise le nombre de critères. Ainsi, nous testons 5 critères différents (LR, FPE, AIC, SC, HQ) et nous choisissons de retenir le retard qui

maximise le nombre de critères d'information (c'est-à-dire le nombre maximal de valeurs minimales).

Par la suite, si les deux séries de notre modèle VAR sont des processus DS intégrés du même ordre, il faut également tester la présence de cointégration et éventuellement la corriger dans notre modèle VAR.

La cointégration désigne le fait que des séries, qui peuvent par ailleurs être faiblement corrélées, présentent une relation stable de long terme. De manière plus imagée, deux séries cointégrées peuvent diverger à court terme, mais elles sont soumises à une « force de rappel » qui les font converger à long terme.

Sur le graphique ci-dessous on voit que les deux séries, représentant les taux d'intérêt à court et long terme du bon du trésor à 10 ans, semblent co-intégrées. La manière de mesurer cela est de voir si la différence entre ces deux séries (term spread) est-elle même une série stationnaire. Si c'est effectivement le cas alors, les deux séries d'origine sont bien cointégrées.

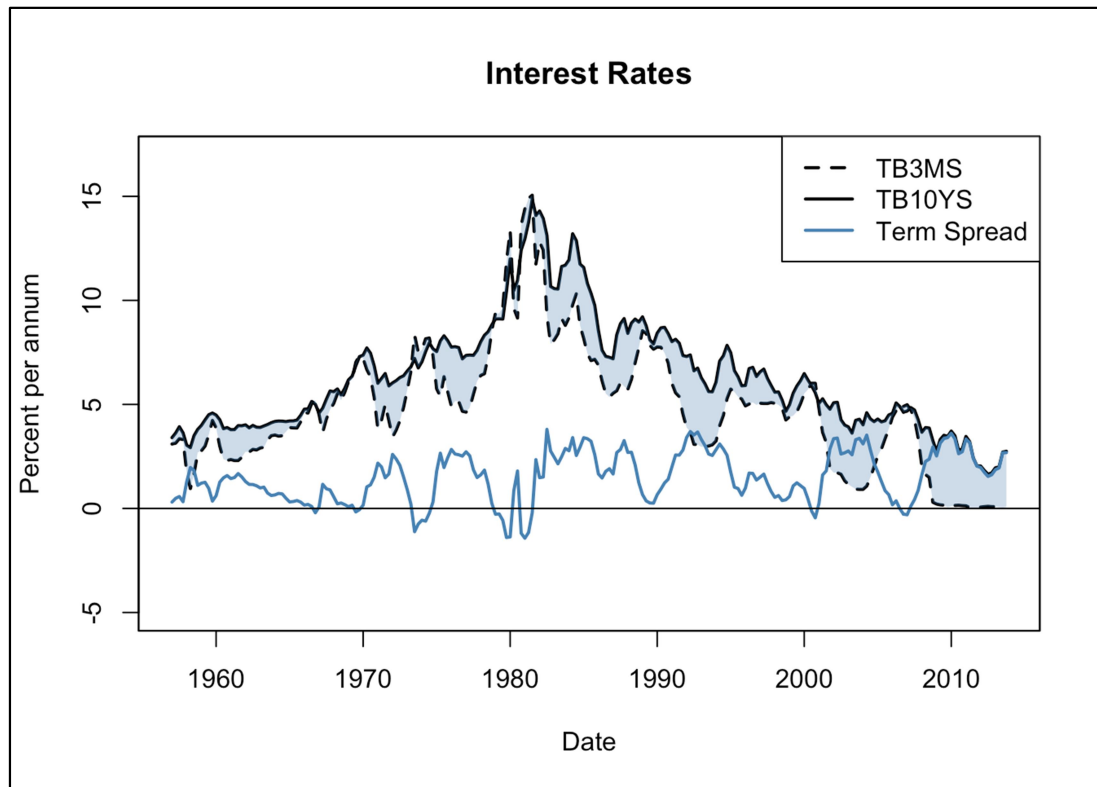


Figure 20 : Evolution du taux d'intérêt à court terme (TB3MS) et à long terme (TB10YS) des bons du trésor américain à 10 ans (source Hanck 2019)

Pour tester la cointégration nous utiliserons le test de Johansen (1988). Dans le cas où nos séries s'avéreraient cointégrées, nous corrigerons le modèle VAR en utilisant un Modèle Vectoriel à Correction d'Erreur (VECM).

3. Modèle VAR et analyse dynamique

Le test de Granger nous permet de définir le sens de la causalité entre nos variables. Il est également possible de déterminer le signe de la relation causale. Pour estimer ce signe on a recours à la formule suivante :

$$\sigma_{X \rightarrow Y} = \frac{\sum_{i=1}^p C_i}{1 - \sum_{i=1}^p D_i}$$

On divise la somme des coefficients relatifs à X (ici la production de charbon) dans l'équation de Y par un moins la somme des coefficients relatifs à Y (la population) dans l'équation de Y. Si le résultat est positif alors que les variations de X causent des variations similaires de Y. Si le signe est négatif, cela que les variations de X causes une variation inverse de Y (les deux variables sont substituables).

En revanche, le test de Granger ne nous dit rien sur la force relative de cette relation de causalité ou les relations dynamiques entre les variables.

Les fonctions de réponses impulsionnelles en simulant un « choc » sur une variable test, permettant ainsi de comprendre comment en dans quelle direction les autres variables sont affectées par ce choc indirect.

La décomposition de la variance permet quant à elle de mesurer dans quelle proportion les autres variables sont affectées suite à ce choc indirect sur la variable testée. La décomposition de la variance permet d'observer à la fois les influences à court (3 ans) et à long terme (15 ans).

IV. Résultats :

1.1 Etude de la causalité entre charbon et population entre 1827 et 1939

En se basant sur les données fournies par l'Annuaire Statistique de la France, on peut obtenir les chiffres concernant la production et la consommation de charbon de la France depuis 1827 de même que l'état de la population.

Nous avons souhaité tester dans un premier temps la causalité entre la variable production de charbon et population sur la période 1827-1939. Le bornage chronologique choisi vise à éviter la chute de production et de consommation de charbon qui a lieu pendant la Seconde Guerre Mondiale. De plus, comme on a pu le voir dans la partie précédente, les années post Seconde Guerre Mondiale sont marquées par une explosion de la consommation de pétrole. Dans la mesure où l'on cherche à observer le sens de la causalité entre population et charbon, il est utile de se limiter à une période historique où le charbon est la forme ultra-dominante de l'énergie produite et consommée.

Sur la période 1827-1939, les tests RES révèlent que la variable population (notée « population ») et la variable production de charbon (notée « charbon ») sont non stationnaires. Nous avons stationnarité la variable population à l'aide de la méthode des différences premières (on génère la variable notée « SPOP ») et la variable charbon à l'aide de la méthode de l'écart à la tendance (on génère la variable notée « SCHARB »).

En appliquant le test de racine unitaire à ces deux nouvelles variables on a pu s'assurer de leur stationnarité (Annexe A.1).

Nous sélectionnons un retard de 5 car c'est celui-ci qui maximise le nombre de critères (LR, FPE, AIC et HQ). Seul le critère SC indique un retard optimal de 2.

Il apparaît que la production de charbon cause, au sens de Granger, la population au seuil de confiance 5% alors que l'inverse n'est pas vrai. En effet avec une probabilité inférieure à 0,05

on peut rejeter l'hypothèse nulle de non-causalité. On a donc une causalité unidirectionnelle qui va de la production de charbon vers la population.

Sample: 1827 1939
Lags: 5

Null Hypothesis:	Obs	F-Statistic	Prob.
SPOP does not Granger Cause SCHARB	107	1.35337	0.2488
SCHARB does not Granger Cause SPOP		4.68957	0.0007

Figure 21 : Test de causalité Production de Charbon-Population 1827-1939

L'étude du signe de la relation entre nos deux variables indique un lien positif entre production de charbon et population.

Le signe positif de la relation causale entre production de charbon et population signifie donc qu'une hausse (respectivement une baisse) de la production de charbon cause une hausse (resp. une baisse) de la population.

L'étude de la décomposition de la variance des deux variables (Figure 22), obtenue à partir de notre modèle VAR, montre qu'une part importante de la variance de la population (environ 23%) est expliquée, dans le court terme (3 ans) par un choc sur les variations de la production de charbon. C'est également le cas pour la relation à long terme (10 ans) où environ 28% de la variance de la population est expliquée par un choc sur les variations de la production de charbon.

Variance Decomposition of SCHARB:			
Period	S.E.	SCHARB	SPOP
1	1.950565	100.0000	0.000000
2	3.248779	99.68883	0.311167
3	3.925065	99.70539	0.294613
4	4.218213	99.06281	0.937185
5	4.522465	98.57668	1.423319
6	4.811117	98.68712	1.312884
7	4.957016	98.75779	1.242206
8	4.989508	98.77305	1.226954
9	4.992368	98.77276	1.227241
10	4.993532	98.74862	1.251381

Variance Decomposition of SPOP:			
Period	S.E.	SCHARB	SPOP
1	293733.6	12.32240	87.67760
2	306099.6	19.08454	80.91546
3	316053.6	23.08907	76.91093
4	321994.8	25.61656	74.38344
5	328540.4	26.44295	73.55705
6	329506.9	26.53885	73.46115
7	329625.2	26.52552	73.47448
8	330522.4	26.50297	73.49703
9	332284.1	27.27635	72.72365
10	334336.0	28.13576	71.86424

Cholesky Ordering: SCHARB SPOP			
--------------------------------	--	--	--

Figure 22 : Décomposition de la variance des variables "SPOP" et "SCHARB"

On a donc pu voir que la production de charbon semble causer une part significative de l'évolution de la population française sur la période 1827-1939. Cependant, le charbon est la seule énergie fossile qui ait été produite en quantité significative sur le sol national. Ainsi, la quasi-totalité du pétrole et du gaz consommée depuis les années 1950 a été en réalité importée. Pour rendre la suite de notre analyse cohérente, en particulier pour la période post Seconde Guerre Mondiale, il est également nécessaire de tester la causalité entre la consommation de charbon et la population sur cette même période (1827-1939).

Il apparaît également qu'au seuil de 5%, la consommation de charbon cause la population de manière unidirectionnelle. L'étude du signe de la relation entre nos deux variables indique là aussi un lien positif entre consommation de charbon et population

Sample: 1827 1939
Lags: 8

Null Hypothesis:	Obs	F-Statistic	Prob.
SPOP does not Granger Cause SCHARB	104	0.53474	0.8273
SCHARB does not Granger Cause SPOP		2.87639	0.0069

Figure 23 : Test de causalité Consommation de Charbon-Population 1827-1939

L'étude de la décomposition de la variance montre qu'un choc sur la consommation de charbon explique une part importante de la variance de la population, à la fois à court terme (27%) et à long terme (29%). Le pouvoir de la variable « consommation de charbon » est légèrement supérieur à celui de la variable « production de charbon ». A l'inverse, un choc sur les variations de la population n'explique que 0,5 à 3,5% de la variation de la consommation de charbon.

Variance Decomposition of SCHARB:			
Period	S.E.	SCHARB	SPOP
1	3.267480	100.0000	0.000000
2	3.295699	99.60640	0.393602
3	3.302880	99.47287	0.527130
4	3.306031	99.43047	0.569534
5	3.401201	97.79897	2.201032
6	3.441574	97.71407	2.285933
7	3.484705	97.59575	2.404246
8	3.585824	96.60327	3.396727
9	3.740259	96.79415	3.205851
10	3.795557	96.74326	3.256738

Variance Decomposition of SPOP:			
Period	S.E.	SCHARB	SPOP
1	299216.9	14.08834	85.91166
2	318998.9	24.40964	75.59036
3	330394.4	27.28728	72.71272
4	335820.3	28.77174	71.22826
5	342434.8	28.60523	71.39477
6	343674.6	28.40295	71.59705
7	345434.8	28.43618	71.56382
8	345996.2	28.44935	71.55065
9	348104.2	28.46561	71.53439
10	349906.4	29.18773	70.81227

Cholesky Ordering: SCHARB SPOP			
--------------------------------	--	--	--

Figure 24 : Décomposition de la variance des variables "SPOP" et "SCHARB"

1.2. Interprétation des résultats

Ces résultats, en particuliers celui concernant consommation et population, restent assez contre-intuitifs et en tout cas à rebours des résultats classiques de la science économique pour expliquer les évolutions démographiques, que l'on considère l'approche malthusienne et anti-malthusienne ou encore l'approche de l'économie écologique et celle du capital humain. Ces différentes approches précisent que l'évolution démographique est soit la cause de l'évolution de la consommation de ressources soit que ces deux variables évoluent de manière plus ou moins indépendante.

La théorie de Malthus explique ainsi que l'augmentation incontrôlée de la population est, dans un premier temps, plus ou moins indépendante de l'état des ressources. La pénurie qui ne manque pas de survenir à moyen terme cause en revanche une chute de la population. La perspective « positiviste » pense quant à elle que la hausse de la population est la cause de la pression sur les ressources disponibles mais que cette pression est bénéfique car elle permet de pousser le progrès technique. La variation de la consommation de ressource est donc vue a priori comme une conséquence de l'augmentation de population. La perspective « écologiste » voit également la démographie humaine comme une cause de surconsommation et de non durabilité à long terme. Enfin l'approche par le capital humain voit l'évolution de la quantité et de la qualité (au sens des connaissances accumulées) de la population comme la cause des évolutions économiques et par cela la cause de l'évolution de la consommation en ressources.

En renversant le sens de la causalité communément admise, ces deux expériences cliométriques nous forcent à nous interroger sur le sens à donner à cette relation. Au lieu de considérer la consommation de ressources énergétiques comme la conséquence de nos besoins primaires comme le chauffage ou la cuisson des aliments, il faut alors considérer la population humaine comme une éventuelle conséquence des besoins en main d'œuvre pour extraire de l'énergie.

Bilan section 1

La production de charbon tout comme la consommation de charbon causent positivement et de manière unilatérale la population entre 1827 et 1939.

Cela va à l'encontre de la plupart des interprétations qui lient plutôt la consommation de ressources en tant que conséquence des variations de population.

Malgré la taille importante de cet échantillon (113 ans) il faut poursuivre nos investigations pour voir si cette relation causale « inattendue » se maintient dans le temps.

2.1. Etude de la relation entre population et autres sources d'énergies

La fin de la Seconde Guerre Mondiale ouvre une période de fort développement économique concomitant à une forte augmentation de la consommation d'énergie, sous diverses formes. Le charbon qui avait jusque-là été la source d'énergie ultra dominante, va peu à peu laisser sa place à d'autres formes d'énergie fossile comme le pétrole ou le gaz naturel. Les énergies renouvelables ainsi que le nucléaire vont également se développer fortement au cours de cette période. Il apparaît donc important de tester les relations entre ces différentes variables et la population. Le but est là encore d'observer si leurs interactions entrent dans le schéma « traditionnel » de la consommation d'énergie comme conséquence des besoins humains ou bien s'ils confirment le résultat des expériences précédentes.

Tableau 3 : relations de causalité entre population, pétrole, gaz, nucléaire et hydroélectricité

période	variables	causalité	p-value	signe
1863-1973	pétrole/ population	→	0,0029	+
1928-1983	gaz (log)/ population	↔	0,0172/ 0,0018	
1923-2017	hydroélectricité/ population	néant		
1959-2017	nucléaire / population	néant		

Nous avons généré des modèles VAR et réalisé des tests de causalité de Granger sur les 4 sources d'énergie principale hormis le charbon, qui a déjà été testé et hormis l'énergie renouvelable qui est apparue trop récemment et de manière trop marginale pour être testée. Il semble que seule la hausse de la variable « consommation de pétrole » cause de manière unidirectionnelle la hausse de la population sur la période 1863-1973 (année du « pic » de la consommation de pétrole en France).

La consommation de gaz naturel entre 1928 et 1983 (date de l'arrivée de l'énergie nucléaire de manière significative) et la population semblent présenter un circuit de causalité. Les données ont été converties en logarithme afin de mieux prendre en compte les variations en début de période, qui semblent très faible en raison de la mauvaise qualité des données origines. Convertir en logarithme permet néanmoins de conserver toutes les propriétés de la série.

La production hydroélectrique et électronucléaire ne présentent pas de relation de causalité avec la population, ce qui reste étonnant que l'on considère la théorie classique de la consommation d'énergie en réponse aux besoins de la population, ou que l'on considère l'hypothèse inverse. Cependant, la production hydroélectrique est restée une énergie relativement marginale (jamais plus de 4% de la consommation totale). L'énergie nucléaire est aussi restée marginale jusqu'en 1978 (où elle dépasse 1% du total) avant de connaître un arrêt de son développement en 2005, ce qui représente une période peut-être trop restreinte pour analyser leurs interactions de manière pertinente.

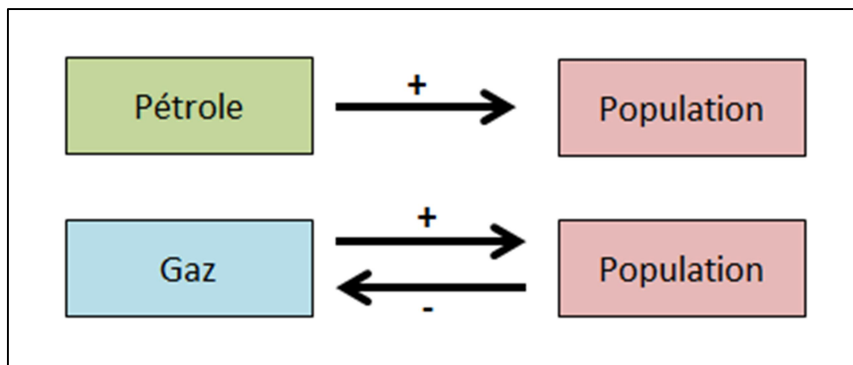


Schéma 1 : Relations causales entre pétrole, gaz et population

Ce schéma résume donc les effets entre variables que nous avons pu identifier. Tout d'abord une hausse (respect. une baisse) de la consommation de pétrole cause une augmentation (respect. une baisse de la population). Le gaz naturel, seconde source d'énergie fossile consommée actuellement en France cause également lorsqu'il augmente (respect. baisse) une hausse (respect. une baisse) de la population. Cependant parallèlement, une hausse (respect. une baisse) de la population cause une baisse (respect. une hausse) de la consommation en gaz.

Cette boucle rétroactive entre population et consommation de gaz pourrait se lire comme le fait qu'à mesure que la population s'accroît, sous le double effet de la hausse de la consommation de gaz et de pétrole, la population agit également pour diminuer progressivement l'importance du gaz naturel dans la consommation totale, peut-être en la substituant par des sources alternatives d'énergie.

Les préoccupations écologiques qui se développent à partir des années 1970 tout comme la volonté de diminuer la dépendance françaises aux importations d'énergies fossiles peuvent aussi être un facteur d'influence, expliquant cet effet négatif de la population sur la consommation de gaz naturel. En effet, le gaz principalement utilisé pour les besoins en chauffage et sanitaires, peut-être en partie substitué par l'énergie nucléaire (chauffage électrique, plaque de cuisson et chauffe-eau électrique...). Cet effet substitution pour raisons écologiques et stratégiques est moins possible pour le pétrole qui ne possède pas de substituts en particulier dans le domaine des transports.

Variance Decomposition of SPETRO2:				Variance Decomposition of SGAZ:			
Period	S.E.	SPETRO2	SPOP2	Period	S.E.	SGAZ	SPOP
1	1164.913	100.0000	0.000000	1	0.048632	100.0000	0.000000
2	1297.813	98.32662	1.673377	2	0.049251	98.56898	1.431021
3	1312.390	97.98535	2.014654	3	0.050213	98.00620	1.993797
4	1349.500	95.41823	4.581771	4	0.050259	97.95840	2.041600
5	1383.653	95.36226	4.637735	5	0.050287	97.95367	2.046334
6	1412.661	93.68223	6.317773	6	0.050292	97.94654	2.053461
7	1461.937	92.71362	7.286381	7	0.050294	97.94281	2.057195
8	1470.227	91.68236	8.317641	8	0.050294	97.94200	2.058003
9	1470.789	91.66699	8.333006	9	0.050294	97.94182	2.058176
10	1487.136	91.81698	8.183018	10	0.050294	97.94175	2.058246
11	1487.510	91.81909	8.180906	11	0.050294	97.94172	2.058277
12	1490.313	91.79149	8.208510	12	0.050294	97.94171	2.058286
13	1492.372	91.62669	8.373313	13	0.050294	97.94171	2.058288
14	1501.086	91.72076	8.279241	14	0.050294	97.94171	2.058289
15	1501.232	91.71720	8.282804	15	0.050294	97.94171	2.058289

Variance Decomposition of SPOP2:				Variance Decomposition of SPOP:			
Period	S.E.	SPETRO2	SPOP2	Period	S.E.	SGAZ	SPOP
1	489730.5	15.17327	84.82673	1	0.006521	17.49682	82.50318
2	549396.3	28.86777	71.13223	2	0.007544	26.31597	73.68403
3	556153.0	28.25574	71.74426	3	0.007652	26.05642	73.94358
4	562563.5	28.59954	71.40046	4	0.007713	26.32945	73.67055
5	577122.2	32.13394	67.86606	5	0.007728	26.22651	73.77349
6	579341.1	32.46021	67.53979	6	0.007733	26.20920	73.79080
7	608503.1	38.40646	61.59354	7	0.007735	26.20067	73.79933
8	610509.7	38.16632	61.83368	8	0.007735	26.19886	73.80114
9	611141.9	38.23146	61.76854	9	0.007735	26.19790	73.80210
10	611799.4	38.33704	61.66296	10	0.007735	26.19758	73.80242
11	613769.6	38.68076	61.31924	11	0.007735	26.19748	73.80252
12	614734.6	38.70363	61.29637	12	0.007735	26.19745	73.80255
13	616211.2	38.94955	61.05045	13	0.007735	26.19744	73.80256
14	616987.3	38.94757	61.05243	14	0.007735	26.19744	73.80256
15	617116.7	38.95676	61.04324	15	0.007735	26.19744	73.80256

Figure 25 : décomposition de la variance de la consommation de pétrole, de gaz et de la population

L'étude de la décomposition de la variance montre à la fois que le pétrole mais aussi le gaz ont des impacts beaucoup plus importants sur la population, que l'inverse. En effet, à court terme (3 ans) seul 2% de la variance de la consommation de pétrole et de gaz est expliquée par un choc sur les variations de la population tandis qu'à long terme (15 ans) ces proportions sont de 8 et 2% respectivement. En revanche la variance de la population à court terme est expliquée à 28% par un choc sur les variations de la consommation de pétrole et 26% par un choc sur les variations de la consommation de gaz naturel. À long terme, ce chiffre augmente même à 39% en ce qui concerne la consommation de pétrole. Ainsi avec cette seule variable on est capable d'expliquer quasiment la moitié des variations de population !

Ce résultat n'est guère surprenant pour le pétrole qui est apparu causal de manière unilatérale, mais peut l'être davantage pour le gaz qui apparaît causal de manière bidirectionnelle. On peut l'interpréter comme le fait qu'une augmentation de la consommation de gaz cause une augmentation plus importante de la population que ce que cette dernière n'induit de rétroaction négative sur la consommation de gaz. Autrement dit l'augmentation de la consommation de la consommation de gaz cause une augmentation de la population qui en retour ne cause qu'une diminution de la consommation par personne.

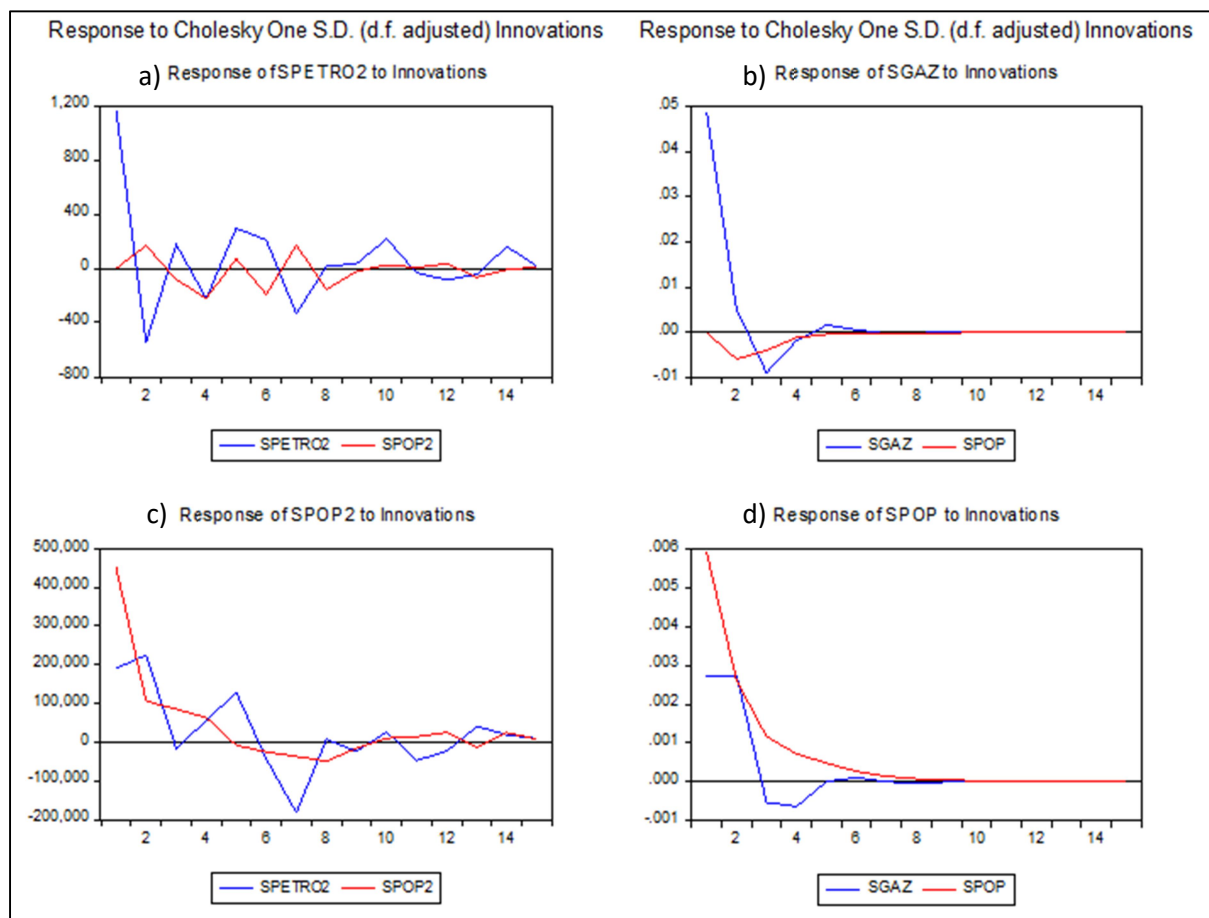


Figure 26 : Fonctions de réponses impulsionnelles de la consommation de pétrole, de gaz et de la population

Les fonctions de réponses impulsionnelles permettent de générer un choc exogène positif sur les variables d'un modèle VAR afin d'observer les réactions d'une variable particulière. On peut voir sur la figure 26 a) comment réagit le pétrole à un choc sur la population en étudiant les évolutions de la courbe « SPOP2 ». Suite à ce choc positif, le pétrole réagit positivement puis négativement à la 3e période. L'alternance de réactions positives et négatives qui suit

s'atténue progressivement. L'effet de la population sur le pétrole paraît donc assez limité. Sur la figure 26 c) on voit que la réaction de la population à un choc positif sur la consommation de pétrole (courbe bleue) est globalement positive jusqu'à la période 6. Par la suite cette réaction devient négative et s'atténue peu à peu. Une hausse de la consommation de pétrole affecte donc durablement la population.

La figure 26 b) illustre quant à elle les effets d'un choc positif sur la population sur la consommation de gaz. Cette réaction est négative avec une réaction maximale à la 2^e période, avant de s'atténuer progressivement. Cela est cohérent avec le test de causalité qui indiquait un effet causal négatif de la population sur le gaz. En revanche, un choc positif (figure 26 d) sur la consommation de gaz entraîne une forte réaction positive de la population (courbe bleue) jusqu'à la période 3. Cette relation devient ensuite négative jusqu'à la 5^e période à partir de laquelle l'effet s'est quasiment estompé. On voit donc que l'effet d'un choc sur la consommation de gaz sur la population a un effet beaucoup plus élevé et durable que l'inverse, ce qui confirme l'analyse de la décomposition de la variance réalisée précédemment.

2.2 Interprétation des résultats

Le fait que nous retrouvions un lien de causalité unilatéral entre le pétrole et la population, renforce les conclusions des expériences cliométriques menées sur la consommation de charbon.

Voir si ce lien se maintient lorsque l'on considère ces variables de manière agrégée sera l'objet de la section suivante.

Il convient en revanche de nous interroger sur les mécanismes qui pourraient entrer en jeu pour expliquer cette dynamique.

Il y a au moins deux manières d'appréhender le fait que la consommation de charbon puis de pétrole *causent* l'évolution de la population. La première hypothèse qui peut être perçue comme positive soutient que le passage aux énergies fossiles à partir de la première révolution industrielle a permis d'améliorer les conditions de vie et dégager du temps de loisir, deux phénomènes responsables de la forte poussée démographique qui s'est opérée depuis lors. Dans ce scénario, l'énergie est effectivement la cause mais elle agit par notre intermédiaire,

nous faisons le *choix* d'augmenter notre démographie. Dit autrement l'énergie est une condition nécessaire mais non suffisante pour la croissance démographique.

La seconde hypothèse plus négative, ne fait pas intervenir une quelconque volonté humaine dans l'équation démographique. La population humaine supplémentaire est en fait *nécessaire* pour extraire l'énergie de l'environnement. Certes au niveau individuel, chacun a l'*impression* de choisir sa fécondité et plus largement sa façon de vivre puis mourir. Mais cela devient faux au niveau collectif. C'est un schéma déjà observé au XIX^e siècle par le sociologue français Emile Durkheim dans son livre *Le Suicide* (1897). Il avait observé, via des lettres d'adieu, que le suicide peut toujours s'expliquer par des raisons individuelles (chagrin d'amour, banqueroute personnelle, mort d'un proche...). Cependant, il observait aussi que ces suicides se produisaient de manière statistiquement attendue, souvent en fin de semaine, lors d'épisodes de mauvais temps... et donc en dehors de toute considération individuelle. Durkheim définissait ainsi le suicide comme un fait social, caractérisé par quatre éléments ; le fait social est contraignant (on ne peut s'y soustraire), historique et stable, extérieur aux consciences individuelles et général et collectif. La croissance démographique pourrait être vue comme un fait social dans la mesure où elle serait irrésistiblement et collectivement causée par la consommation d'énergie. En d'autres termes, l'Homme n'aurait pas vraiment le choix de procréer ou non, ce dernier étant déterminé par des tendances historiques supposées stables et générales. L'Homme naitrait pour extraire de l'énergie. Nous aurions donc en sus de notre destin social évoqué par les sociologues un destin énergétique.

Trancher entre nos hypothèses positive et négative nécessiterait d'observer si certains pays s'écartent du destin démographique que promet une soudaine abondance énergétique. Il faudrait en effet trouver au moins un cas (pays ou période historique) où une forte augmentation de la consommation d'énergie n'est pas liée à une accélération démographique en raison d'un choix collectif fort. Une telle anomalie romprait la condition de stabilité historique du fait social et avantagerait donc l'hypothèse d'un choix délibéré de procréer.

Pour qualifier de manière plus précises nos deux hypothèses, on peut penser à la dichotomie offerte par le théâtre entre les styles de tragédie et du drame : le premier dans la tradition mythologique grecque appelle l'idée d'un certain déterminisme, la vie des personnages étant écrite de toute éternité dans le livre du Destin, et ce sans qu'aucune volonté individuelle ne puisse interférer. A l'inverse le drame fait intervenir le choix des personnages qui peuvent

alors influencer leur devenir pour le meilleur ou pour le pire. L'hypothèse 1 serait notre « drame » énergétique tandis que l'hypothèse 2 serait une « tragédie » énergétique.

Bilan de la section 2

Le pétrole à l'instar du charbon apparaît causal de manière unilatérale et positive sur la période 1863-1973. La population est causée par l'énergie.

Cela renforce la conclusion de la section 1 et nous mène à élaborer des hypothèses explicatives :

- **Hypothèse dramatique**
- **Hypothèse tragique**

Il faut à présent voir si cette causalité se maintient lorsque l'on agrège les sources d'énergie avant de pouvoir trancher entre ces hypothèses.

3.1 Etude de la relation entre population et consommation d'énergie totale

Après avoir constaté que consommation de charbon et de pétrole, causaient séparément la population sur une période de près de 150 ans, notre interrogation porte à présent sur la relation de causalité entre l'agrégation de ces différentes variables énergétiques et la population. Le schéma identifié séparément pour les deux sources d'énergies principales du XIXe et XXe siècle se maintient-il lorsque l'on intègre les trajectoires contrastées et les différentes caractéristiques des autres sources d'énergies.

Lorsque l'on additionne la consommation de charbon (exprimée en ktep) à la consommation de pétrole sur la période 1827-1975 (date à laquelle cet ensemble représente moins de 86% de l'énergie totale), on s'aperçoit que cet ensemble cause de manière unidirectionnelle la population. Si on additionne les 6 sources d'énergie de notre base de données, on s'aperçoit que la consommation d'énergie totale cause également de manière unidirectionnelle la population sur la période 1827-1990. Cette périodisation a été choisie pour prendre en compte le fait qu'à partir des années 1990 on voit un début de décrochage entre consommation d'énergie et population, sans doute du au décollage massif des importations de différents produits notamment en provenance d'Asie. Cette vision semble être confirmée par un article

de recherche de 2018, s'intéressant à la balance commerciale physique de la France (Magalhães et al. 2018). Les auteurs notent en effet, qu'à partir des années 1980 « *les activités industrielles intensives en énergie [...] se délocalisent hors des pays de l'OCDE, et notamment vers l'Asie* ». C'est notamment à cette époque que la France passe d'un statut d'exportateur de produits sidérurgiques à un statut d'importateur.

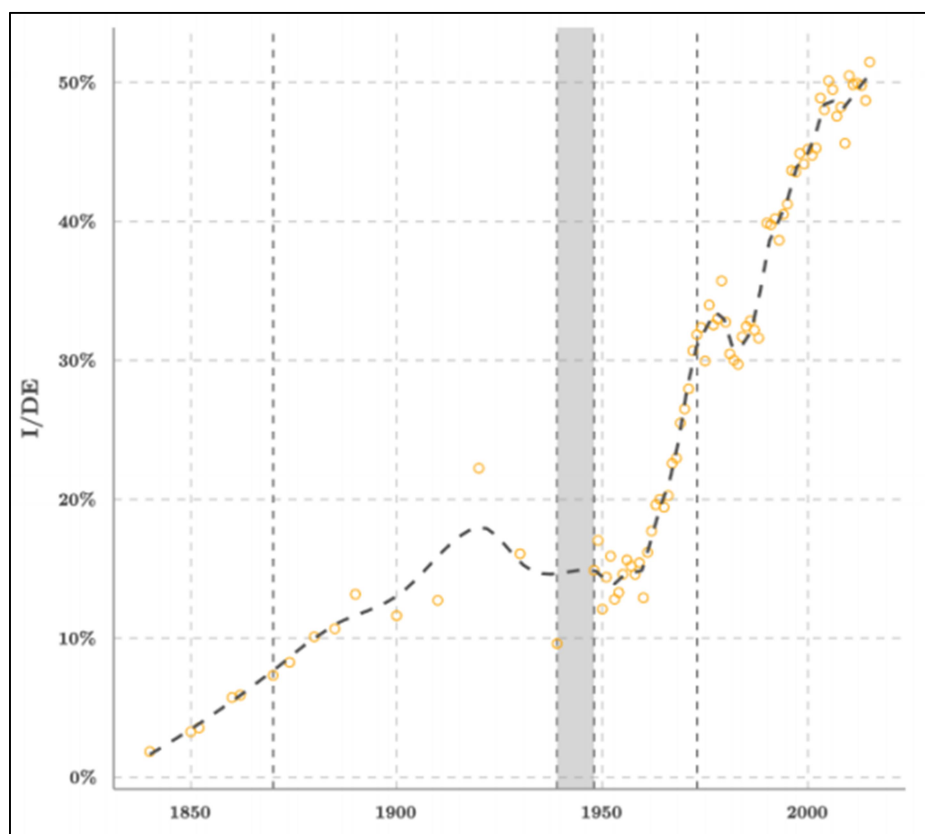


Figure 27 : Rapport entre importation et extraction locale de flux physiques concernant la biomasse, les minéraux métalliques et non-métalliques ainsi que les vecteurs d'énergie fossile (source : Magalhães et al. 2018)

On peut observer sur la figure 27 que l'augmentation des importations (I) de flux physiques comparativement à l'extraction locale (DE, Domestic Extraction) est du même ordre de grandeur entre la période 1950-1980 qu'entre la période 1990-2015. Pourtant nous avons vu que la croissance de la consommation d'énergie (gaz, pétrole, charbon) principalement importée, a été très faible à partir des années 1990 et est même en déclin continu depuis 2005. La hausse du rapport I/DE ne peut donc être due qu'à une augmentation des importations des autres catégories prises en compte dans l'étude à savoir les minéraux métalliques et non-métalliques ainsi que la biomasse.

Il semble même que cette forte augmentation des importations physiques de matière à la fin des années 1980, début des années 1990, constitue une fourchette basse, l'étude ne semblant en effet pas prendre en compte les importations (en tonnes) de produits finis.

Cependant, si l'on considère l'ensemble de la période que couvre notre mémoire, y compris les 3 dernières décennies, l'énergie conserve une forte causalité unidirectionnelle envers la population. Cela peut peut-être s'expliquer par le fait que la période de forte divergence, où la consommation d'énergie décline tandis que la population poursuit son augmentation, ne couvre en réalité qu'une période restreinte de 12 années (2005 à 2017) qui n'impacte pas encore la relation de long terme, notre échantillon couvrant un total de 191 ans.

période	variables	causalité	p-value	signe
1827-1975	charbon+pétrole/ population	→	0,004	+
1827-1990	énergie totale/ population	→	0,0092	+
1827-2017	énergie totale/ population	→	0,0118	+

Tableau 4 : Relations de causalité entre énergie et population

Toutes les relations de causalité identifiées sont positives, en d'autres termes une hausse (resp. une baisse) de la consommation d'énergie cause une hausse (resp. une baisse) de la population.

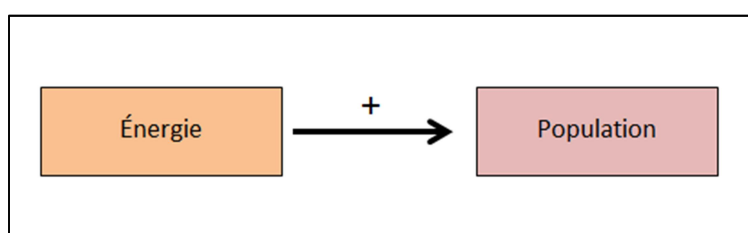


Schéma 2 : Relation de causalité entre consommation d'énergie totale et population (1827-2017)

L'étude de la décomposition de la variance nous révèle contre toute attente que c'est la variable « charbon + pétrole » qui explique le plus les variations de la population (de 22 à 23% à court

et long terme). En revanche, si on considère la consommation d'énergie totale sur la période 1827-1990, la variance expliquée n'est plus que de 18% et elle tombe même à 3,5% si on considère la période 1827-2017. Ce dernier résultat n'est pas si surprenant si l'on se rappelle « l'énergie importée », à partir des années 1990 et qui n'est pas présente dans nos statistiques. En revanche la diminution de pouvoir explicatif est plus mystérieux sur la période 1827-1990 où l'on considère pourtant l'ensemble de la consommation énergétique et non plus seulement une partie comme sur la période 1827-1975. L'explication pourrait résider dans le fait que, le biais dû à l'énergie importée soit présent de manière antérieure aux années 1990, ce que tendrait à montrer le travail de Magalhães et al. de 2018. Leurs données semblent en effet indiquer qu'une forte hausse de ces importations est présente dès les années 1980. Une autre explication pourrait résider dans le fait que toutes les sources d'énergies ne sont pas responsables avec la même intensité des évolutions démographiques. En effet, la « qualité » énergétique de chacune de nos 6 sources pourrait être très disparate, expliquant ainsi la diminution du pouvoir explicatif lorsqu'on agrège toutes ces variables. Une dernière source d'explication pourrait être un changement de comportement de la population française qui tendrait à dé-corréler sa fertilité, sa mortalité et son solde migratoire de la variable énergétique durant les 15 années qui séparent 1975 de 1990.

Tableau 5: Décomposition de la variance des trois modèles VAR étudiés entre 1827 et 2017

Pétrole + Charbon 1827-1975				Énergie totale 1827-1990				Énergie totale 1827-2017			
Variance Decomposition of SENER2:				Variance Decomposition of SENER2:				Variance Decomposition of SPOP2:			
Period	S.E.	SENER2	SPOP2	Period	S.E.	SENER2	SPOP2	Period	S.E.	SPOP2	SENER
1	3664.254	100.0000	0.000000	1	3957.145	100.0000	0.000000	1	413782.4	100.0000	0.000000
2	3839.114	98.49779	1.502213	2	4114.411	98.25834	1.741661	2	441060.9	97.00855	2.991449
3	3868.218	98.22354	1.776459	3	4138.081	97.93808	2.061925	3	445067.5	96.62118	3.478825
4	3873.308	98.17567	1.824330	4	4141.864	97.88801	2.113987	4	445661.3	96.44845	3.551547
5	3874.203	98.16727	1.832735	5	4142.473	97.87763	2.122374	5	445749.4	96.43766	3.562344
6	3874.360	98.16579	1.834213	6	4142.571	97.87627	2.123725	6	445762.5	96.43605	3.563947
7	3874.388	98.16553	1.834473	7	4142.586	97.87608	2.123943	7	445764.4	96.43581	3.564185
8	3874.393	98.16548	1.834519	8	4142.589	97.87602	2.123978	8	445764.7	96.43578	3.564221
9	3874.394	98.16547	1.834527	9	4142.589	97.87602	2.123983	9	445764.8	96.43577	3.564226
10	3874.394	98.16547	1.834528	10	4142.589	97.87602	2.123984	10	445764.8	96.43577	3.564227
11	3874.394	98.16547	1.834529	11	4142.589	97.87602	2.123985	11	445764.8	96.43577	3.564227
12	3874.394	98.16547	1.834529	12	4142.589	97.87602	2.123985	12	445764.8	96.43577	3.564227
13	3874.394	98.16547	1.834529	13	4142.589	97.87602	2.123985	13	445764.8	96.43577	3.564227
14	3874.394	98.16547	1.834529	14	4142.589	97.87602	2.123985	14	445764.8	96.43577	3.564227
15	3874.394	98.16547	1.834529	15	4142.589	97.87602	2.123985	15	445764.8	96.43577	3.564227
Variance Decomposition of SPOP2:				Variance Decomposition of SPOP2:				Variance Decomposition of SENER:			
Period	S.E.	SENER2	SPOP2	Period	S.E.	SENER2	SPOP2	Period	S.E.	SPOP2	SENER
1	463318.9	12.04557	87.95443	1	444424.8	10.69402	89.30598	1	4215.360	7.818547	92.18145
2	499476.4	20.97003	79.02997	2	474708.7	17.12304	82.87696	2	4336.460	10.57757	89.42243
3	505754.8	22.41974	77.58026	3	479533.4	18.15473	81.84527	3	4353.016	11.01250	88.98750
4	506854.0	22.66907	77.33093	4	480308.5	18.31954	81.68046	4	4355.453	11.07738	88.92262
5	507047.2	22.71274	77.28726	5	480433.3	18.34603	81.65397	5	4355.815	11.08702	88.91298
6	507081.2	22.72042	77.27958	6	480453.4	18.35029	81.64971	6	4355.869	11.08845	88.91155
7	507087.2	22.72177	77.27823	7	480456.6	18.35098	81.64902	7	4355.877	11.08868	88.91134
8	507088.3	22.72201	77.27799	8	480457.1	18.35109	81.64891	8	4355.878	11.08869	88.91131
9	507088.5	22.72205	77.27795	9	480457.2	18.35110	81.64890	9	4355.878	11.08870	88.91130
10	507088.5	22.72206	77.27794	10	480457.2	18.35111	81.64889	10	4355.878	11.08870	88.91130
11	507088.5	22.72206	77.27794	11	480457.2	18.35111	81.64889	11	4355.878	11.08870	88.91130
12	507088.5	22.72206	77.27794	12	480457.2	18.35111	81.64889	12	4355.878	11.08870	88.91130
13	507088.5	22.72206	77.27794	13	480457.2	18.35111	81.64889	13	4355.878	11.08870	88.91130
14	507088.5	22.72206	77.27794	14	480457.2	18.35111	81.64889	14	4355.878	11.08870	88.91130
15	507088.5	22.72206	77.27794	15	480457.2	18.35111	81.64889	15	4355.878	11.08870	88.91130
Cholesky Ordering: SENER2 SPOP2				Cholesky Ordering: SENER2 SPOP2				Cholesky Ordering: SPOP2 SENER			

3.2. Interprétation des résultats

Nous avons vu que la consommation d'énergie considérée de manière agrégée gardait sa relation causale unidirectionnelle avec la population.

Néanmoins, le pouvoir explicatif de l'énergie agrégée pour éclairer l'origine des variations de la population est bien inférieur à celui du pétrole pris indépendamment des autres sources d'énergie (voir section 2).

Comment expliquer cela ? Il est possible comme nous l'avons évoqué antérieurement, que certaines sources d'énergies soient trop anecdotiques pour pouvoir impacter durablement le « niveau » de population, toutefois elles seraient suffisamment importantes pour « parasiter » le pouvoir explicatif de la variable « consommation d'énergie totale ». Il est également possible que certaines sources d'énergie même non marginales, soient elles-mêmes

causées par une autre source d'énergie. Dans ce cas ajouter ce type d'énergie « secondaire » à notre variable explicative unique (consommation d'énergie) risque de ne pas être totalement pertinent. De fait, cela reviendrait à compter deux fois la même variable.

L'objet de la section suivante est justement de tester les relations entre les variables énergétiques et d'en tirer des enseignements pour améliorer notre modèle explicatif. Cependant, le modèle VAR se prête mal à l'étude des variations entre ces relations sur longue période. On peut par exemple penser que l'extraction du pétrole avant 1939 est réalisée principalement « grâce » à l'extraction du charbon. En effet, au XIX^e siècle le pétrole une fois extrait est transporté par train, moyen de transport fonctionnant au charbon, que ce soit dans la « Oil region » (Pennsylvanie) des Etats-Unis où depuis Bakkou dans l'empire Russe (Auzanneau 2016). Son processus d'extraction, de transport puis de raffinage nécessite également d'importantes quantités d'acier, la sidérurgie de l'époque reposant également sur le charbon. De même le gaz utilisé à cette époque est un gaz manufacturé à partir du charbon dans des « usines à gaz ». Ces usines sont installées près des grandes villes dans la mesure où elles ont pour vocation d'assurer l'éclairage public. Au contraire, la production actuelle de charbon est sans doute dépendante du pétrole. En effet, l'extraction de ce minerai dans les mines à ciel ouvert implique le fonctionnement d'un parc important de machines fonctionnant au pétrole (excavatrices, camions). Ironiquement aujourd'hui aux Etats-Unis le transport du charbon se fait grâce à des trains fonctionnant au diesel et non plus au charbon. Egalement, l'extraction du gaz naturel lorsqu'elle est réalisée en mer est assurée par des plateformes souvent alimentées par des générateurs diesel. Le transport du charbon et du gaz par bateau ou par train repose aussi souvent sur la combustion du pétrole.



Figure 28 : Excavation du charbon dans une mine à ciel ouvert en Russie

En suivant cette logique, il pourrait donc y avoir des phases historiques avec différentes énergies « motrices ». Il serait alors pertinent d'envisager une pondération entre elles afin d'améliorer le pouvoir explicatif de l'énergie envers les évolutions démographiques. Malheureusement, une telle pondération est difficile à établir sur des bases objectives, à la fois par manque d'indicateurs et en raison de l'intrication entre les différentes sources d'énergie.

Le fait que l'on identifie pour le cas français différentes « couches démographiques » correspondant peu ou prou à l'apparition de nouvelles sources d'énergies, si ce n'est dominantes du moins « motrices », pourrait permettre d'établir une telle pondération.

Bilan section 3

La variable « énergie totale » cause la population de manière unilatérale et positive tout comme les précédentes expériences. Néanmoins son pouvoir explicatif paraît paradoxalement amoindri.

Pour expliquer le pouvoir explicatif moindre de l'énergie globale, par rapport au pouvoir explicatif du pétrole il y aurait alors 3 hypothèses :

- Certaines énergies sont trop faibles pour causer la population et parasitent l'analyse
- Certaines sources d'énergie sont en réalité des sources d'énergies secondaires et les comptabiliser revient également à fausser l'analyse
- Le pouvoir causal de chaque source d'énergie est susceptible de varier au cours du temps, il serait pertinent d'introduire des coefficients de pondération selon une méthode à définir.

4.1 Etude de la relation entre variables énergétiques (présentation des relations causales)

Nous avons considéré la période 1959-2017 afin d'étudier les relations entre nos variables énergétiques entre elles ainsi qu'avec la population, ce qui nous permettra de préciser notre modèle et éventuellement d'améliorer son pouvoir explicatif. Nous avons exprimé nos variables en logarithmes afin d'obtenir une échelle de grandeur cohérente. Nous avons exclu de notre échantillon le nucléaire en raison de sa « non-causalité » avec la population observée à la section 2 de la partie III. Le renouvelable n'a pas non plus été pris en compte dans le modèle du fait de sa jeunesse et du manque de données. En revanche nous avons inclus l'énergie hydroélectrique qui bien qu'apparaissant non causale prise isolément pourrait avoir un effet sur le développement de certaines sources d'énergie en raison de son antériorité. En effet, l'énergie hydroélectrique est la troisième source d'énergie par ordre d'ancienneté dans notre échantillon puisqu'elle apparaît dès 1923 à la suite du charbon et du pétrole.

Tableau 6 : résultats des tests de causalité entre 1959 et 2017

variables (log)	causalité	p-value	signe
charbon/ gaz	→	0,0048	-
charbon/ pétrole	→	0,0615	-
gaz/population	→	0,0396	+
pétrole/ population	→	0,0383	+

Les tests de causalité révèlent que la consommation de charbon cause négativement la consommation de gaz et de pétrole. Autrement dit, lorsque que la consommation de charbon diminue celle du pétrole et du gaz augmente. Il s'agit d'un effet de substitution, le manque de charbon dû à des raisons géologiques a « forcé » la société française à le remplacer par des sources d'énergies alternatives comme le pétrole et le gaz. Ces dernières, rappelons le, sont des énergies principalement importées tandis que le charbon était lui principalement produit sur le territoire national.

On observe également que la consommation de gaz cause unilatéralement la population et ce de manière positive. Il en va de même pour le pétrole. Cela signifie que lorsque la consommation de gaz et de pétrole augmente cela cause de manière similaire une augmentation de la population. En cas de baisse de la consommation de ces deux énergies on peut au contraire s'attendre à ce que la population baisse aussi en réponse.

Le schéma ci-dessous synthétise ce circuit de causalité.

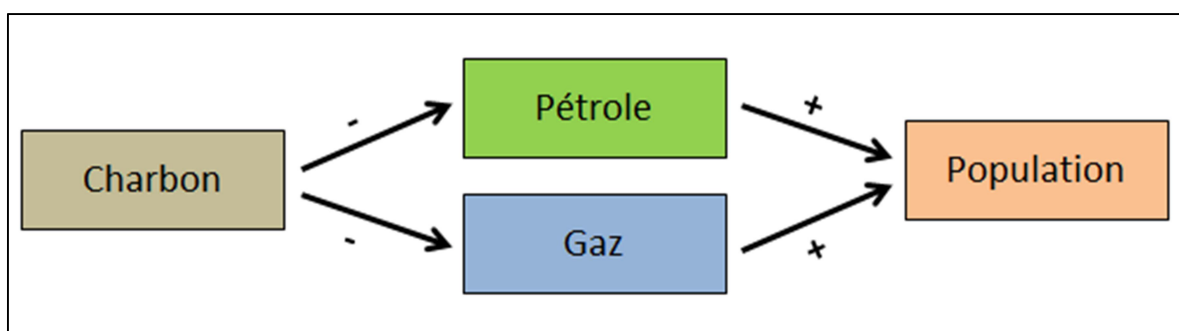


Schéma 3 : chaîne de causalité entre charbon, gaz, pétrole et population

En revanche, les tests ne révèlent pas de relation causale entre la variable consommation d'hydroélectricité et population ce qui confirme le résultat de la section 2 partie III. On n'observe pas non plus entre pétrole et gaz, c'est-à-dire que ces deux variables sont indépendantes l'une de l'autre. Ainsi, l'augmentation récente de la consommation de gaz n'est pas liée à un effet substitution avec la consommation de pétrole mais bien à une addition de ces deux sources d'énergie. On peut donc voir si l'on se rapporte à la période récente, une ambivalence dans la politique environnementale. En effet, on a cherché à substituer au charbon des énergies moins carbonnées comme le gaz et le pétrole. (cf figure 38).

Mais cette politique de substitution s'arrête à la porte du réalisme économique, puisque malgré le fait que le gaz soit une énergie moins carbonnée on ne cherche pas à le substituer au pétrole. En réalité cette substitution est peu probable voire impossible, le pétrole de par sa forme liquide et sa densité énergétique étant difficilement remplaçable dans un certain nombre de domaines comme les transports.

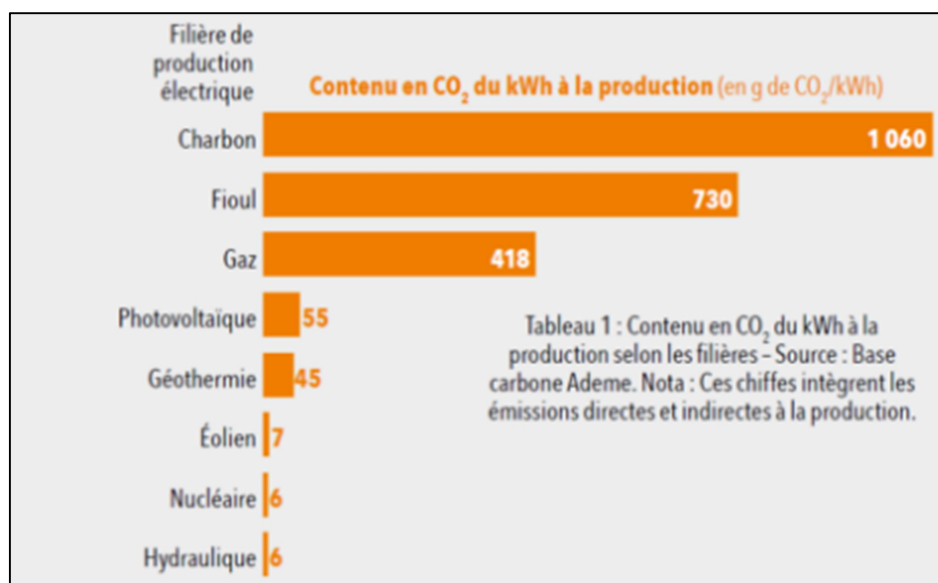


Figure 29 : Emission de CO₂ en g/kWh par source d'énergie utilisée pour la production d'électricité

4.2 Etude de l'intensité des différentes relations causales

A présent il convient d'étudier l'intensité des différentes relations causales que nous avons identifiées dans le tableau 6. En effet on a bien vu que la consommation de charbon causait négativement (effet substitution) celle du pétrole et du gaz mais dans quelles proportions ? Ces deux énergies ont-elles eu pour unique vocation de remplacer le charbon déclinant ou ont-elles fait plus que compenser cette baisse ?

Les variations de la consommation de charbon expliquent près de 19% de la variance de la consommation de gaz à la fois à court (3 ans) et à long terme (15 ans). En revanche cet effet substitution est moins visible pour le pétrole puisque les variations de la production de charbon n'expliquent que 5% de la variance de la consommation de pétrole à court terme et 9% à long terme. Ainsi donc le gaz a été une énergie d'avantage dédiée à cette mission de substitution de la consommation de charbon tandis que la hausse de la consommation de pétrole était davantage due à des usages nouveaux comme l'essor du transport automobile ou de la pétrochimie. Cet effet substitution est plus important pour le gaz car le charbon au sortir de la Seconde Guerre Mondiale a été surtout utilisé pour la production électrique, domaine dans lequel le gaz est également très présent par opposition au pétrole. Néanmoins on voit que la majorité de la hausse de la consommation de gaz (80%) a une cause étrangère à sa mission originelle de substitution.

En ce qui concerne la population on peut voir qu'à court et long termes 7% de sa variance est expliquée par les variations de la consommation de gaz et 11% par les variations de la consommation de pétrole. Le pouvoir explicatif de ces deux variables correspond bien au résultat de l'expérience présentée dans le tableau 5. En effet, sur la période 1827-2017 où l'on considérait comme variable explicative la consommation totale d'énergie seuls 11% de la variance de la population étaient expliqués par les variations de la consommation d'énergie contre 18% si l'on considère notre modèle uniquement basé sur la consommation de gaz et de pétrole sur la période 1959-2017. Cela irait dans le sens d'un effet parasite sur le pouvoir explicatif global de l'énergie envers la population que pourraient avoir certains types d'énergie selon les modalités évoquées précédemment (voir bilan 3.2). Le fait que la période considérée ne soit pas exactement la même nous conduit cependant à rester prudent sur cette interprétation.

Tableau 7: Décomposition de la variance du modèle VAR 1959-2017

(A) décomposition de la variance de Scharb						
Période	S.E	Scharb	Sgaz2	Shydro	Spetro2	Spop2
1	0,04	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,05	97,72	0,17	0,04	2,06	0,00
10	0,05	95,47	0,28	0,09	4,07	0,08
15	0,05	95,44	0,28	0,09	4,10	0,08
(B) décomposition de la variance de Sgaz2						
Période	S.E	Scharb	Sgaz2	Shydro	Spetro2	Spop2
1	0,02	5,08	94,92	0,00	0,00	0,00
3	0,03	19,34	74,95	1,67	3,29	0,75
10	0,03	19,60	74,48	3,28	3,28	0,84
15	0,03	19,60	74,48	3,28	3,28	0,84
(C) décomposition de la variance de Shydro						
Période	S.E	Scharb	Sgaz2	Shydro	Spetro2	Spop2
1	0,06	0,35	0,27	99,37	0,00	0,00
3	0,07	2,00	1,34	88,99	2,72	4,94
10	0,07	2,31	1,55	88,31	2,90	4,92
15	0,07	2,31	1,55	88,31	2,90	4,92
(D) décomposition de la variance de Spetro2						
Période	S.E	Scharb	Sgaz2	Shydro	Spetro2	Spop2
1	0,02	0,70	0,10	7,70	91,50	0,00
3	0,02	5,10	2,47	6,09	84,10	2,24
10	0,02	8,53	2,42	5,76	80,85	2,43
15	0,02	8,58	2,42	5,75	80,82	2,43
(E) décomposition de la variance de Spop2						
Période	S.E	Scharb	Sgaz2	Shydro	Spetro2	Spop2
1	0	0,37	4,58	0,24	5,81	89,00
3	0	2,80	7,29	2,27	10,44	77,20
10	0	4,00	7,15	2,25	10,99	75,61
15	0	4,01	7,15	2,25	10,99	75,59

La figure 30 d) étudie les effets qu'un choc positif sur les différentes variables du modèle peut avoir sur la consommation de pétrole. Il apparaît que le pétrole réagit positivement à un choc sur la population. En d'autres termes, une augmentation soudaine de la population va entraîner à court terme une hausse de la consommation de pétrole, cet effet s'estompant progressivement avec le temps. Le pétrole réagit également négativement à un choc positif sur la consommation de charbon et de gaz, indiquant un effet substitution déjà identifié précédemment pour ces deux énergies.

Enfin la figure 30 e) montre que la population réagit positivement et de manière stable à un choc positif sur la consommation de pétrole (courbe noire). La population réagit aussi positivement, bien que de manière moins prononcée en cas d'un choc positif sur la consommation de gaz mais cet effet est moins durable puisqu'il devient légèrement négatif à la 3e période. Néanmoins ces deux effets correspondent à la causalité positive identifiée précédemment que ces deux variables possèdent sur la population. La population réagit également positivement à un choc sur la consommation de charbon avant que cet effet devient négatif à la 3e période avant de s'estomper progressivement.

A l'aide des fonctions de réponse impulsionnelle on peut analyser les réactions d'une variable particulière en générant des chocs positifs sur les variables présentes dans notre modèle. On peut voir tout d'abord que le charbon (figure 30 a) réagit de manière négative (courbe noire) à un choc positif sur la consommation de pétrole. Cette réaction négative est maximale à la période 3 avant de s'atténuer progressivement. En revanche, le charbon réagit positivement à un choc sur la consommation de gaz bien que cet effet soit relativement réduit. La figure 30 b nous montre que la consommation de gaz réagit de manière négative à un choc positif sur la production de charbon. Cela confirme la causalité négative que nous avons identifiée précédemment entre ces deux variables. Le gaz réagit aussi de manière négative à un choc sur la consommation de pétrole, mais de manière relativement faible, confirmant l'absence de relation de causalité.

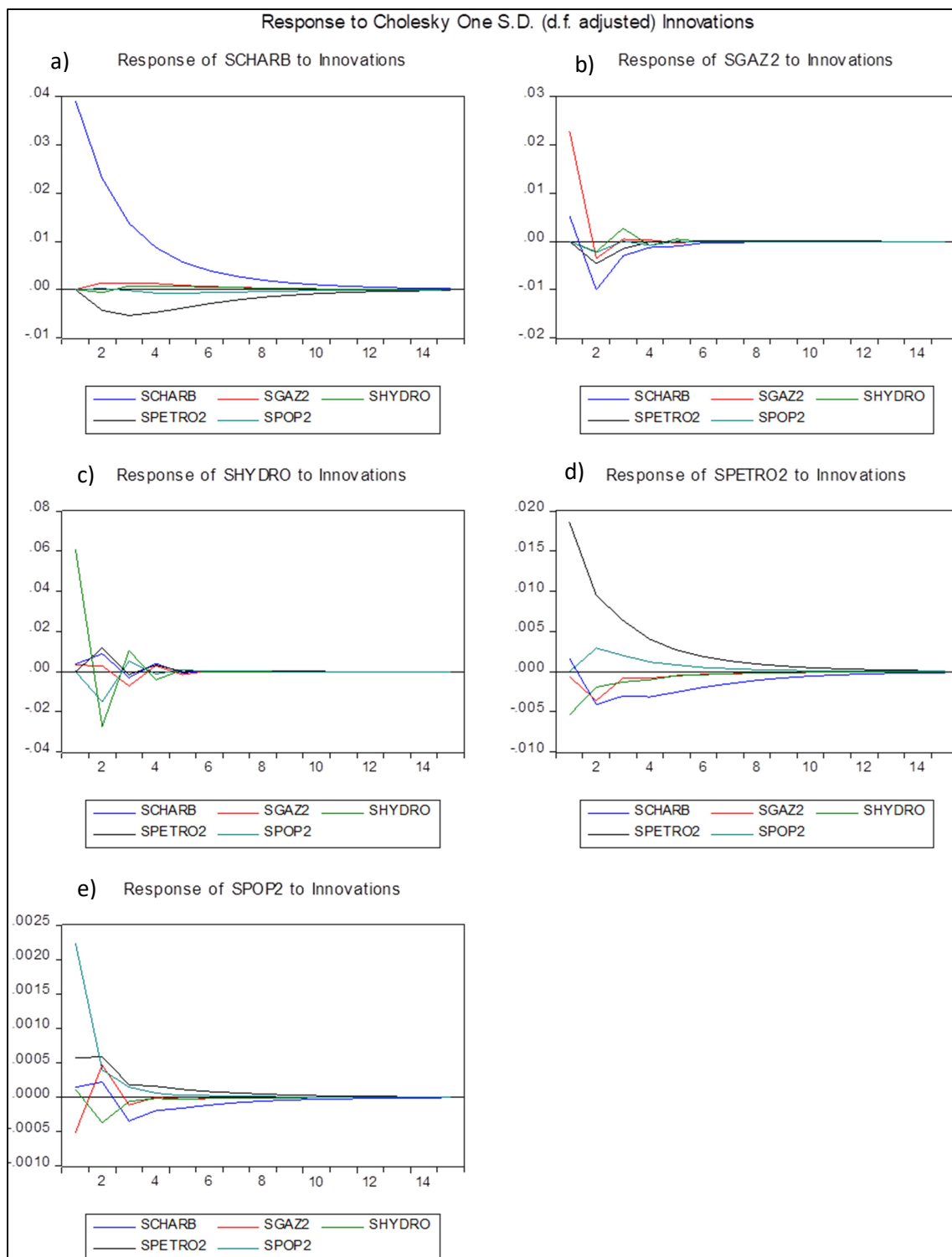


Figure 30 : réponses impulsionnelles des différentes variables du modèle VAR (1959-2017)

A la suite de cette expérience l'hydroélectricité ne semble pas être une variable causale envers les autres sources d'énergie.

De plus le charbon sur la période récente (1959-2017) ne semble pas non plus causer directement la population, cette énergie ayant été progressivement substituée au profit d'autres sources comme le pétrole ou le gaz.

Le pétrole semble causer de manière plus importante la population que ne le fait le gaz naturel.

Ces éléments devront être pris en compte pour construire un modèle explicatif plus précis des évolutions démographiques.

V. Discussion des résultats

Nous avons vu sur un ensemble de périodes relativement variées et à l'aide de modèles comportant des variables diverses que le charbon, le pétrole et dans une moindre mesure le gaz naturel causaient de manière unilatérale l'évolution démographique de la France. En d'autres termes ces résultats apparaissent suffisamment solides pour que l'on s'autorise à réfléchir sur la signification d'une telle relation.

En effet, comprendre de quelle manière l'évolution de la consommation d'énergie peut avoir un impact sur l'évolution démographique n'est pas nécessairement aisé au premier abord. C'est particulièrement vrai dans nos sociétés fortement « tertiaisées » et dont une fraction seulement de l'économie repose sur l'extraction de ressources. Le lecteur ne manquera pas de faire remarquer que la croissance démographique depuis le XIX^e siècle a été en majorité absorbée par des secteurs comme le tourisme, l'industrie, la santé, et même l'enseignement au sens large, et non par le secteur minier ou pétrolier. Cet argument peut-être recevable si l'on considère que tous ces secteurs précédemment énumérés ne servent en aucune manière l'extraction d'énergie. Or il nous apparaît qu'une telle vision est en grande partie fausse.

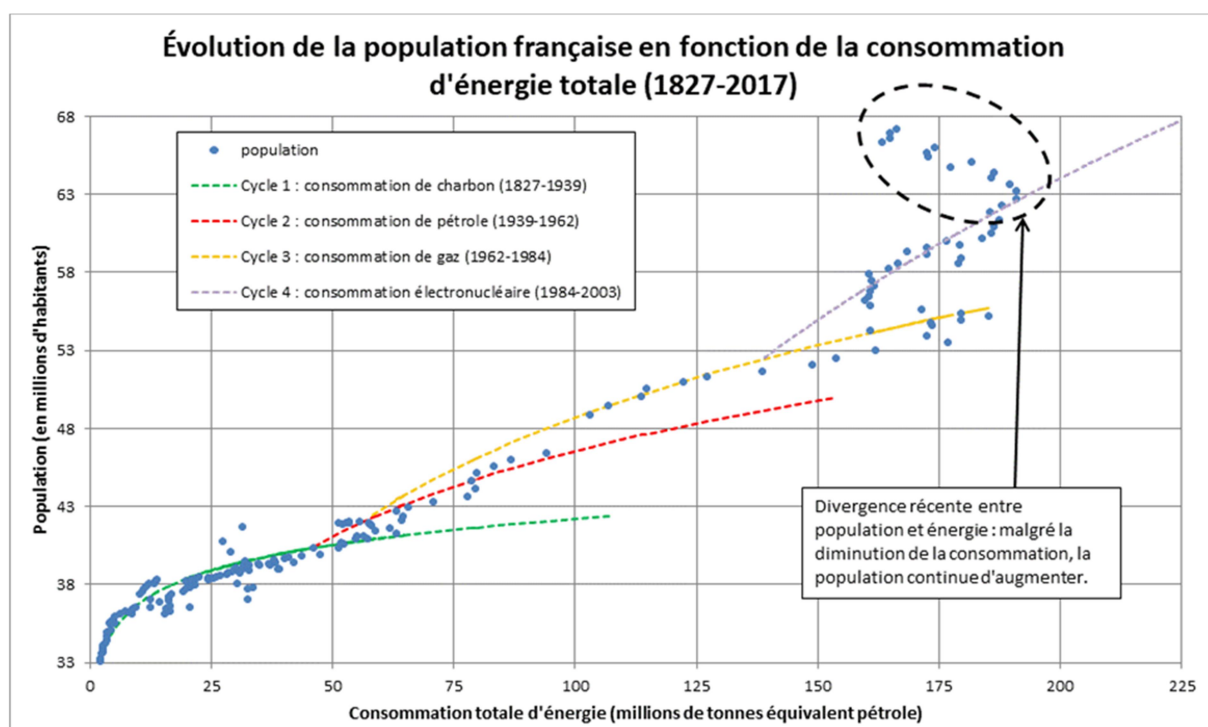


Figure 31: Différents cycles démographiques suivant l'apparition de nouvelles sources d'énergie

Si l'on observe graphiquement l'évolution de la population en fonction de la consommation d'énergie on constate que la croissance démographique réagit très fortement avec les premières unités d'énergie consommée et moins fortement avec les dernières unités. Dit autrement il semble y avoir un « rendement marginal » décroissant, chaque unité d'énergie supplémentaire consommée conduisant à générer de moins en moins d'unité de population. L'énergie est moins en moins apte à faire apparaître des individus supplémentaires.

Néanmoins ce schéma n'est pas définitif puisque lorsqu'une nouvelle source d'énergie fait son apparition on observe à nouveau un nouvel effet de rendement marginal décroissant se caractérisant par un boom démographique rapide suivi d'un ralentissement. Ainsi le graphique ci-dessus met en évidence quatre cycles démographiques liés respectivement à l'apparition du charbon, du pétrole, du gaz puis du nucléaire.

Pourquoi la relation entre population et énergie n'est pas linéaire ou exponentielle mais au contraire logarithmique (rendements décroissants) ? On pourrait s'attendre par exemple à ce qu'une unité d'énergie cause de tout temps et en tout lieu la même création de population. On pourrait aussi s'attendre que grâce au progrès technique, chaque unité d'énergie soit utilisée

de plus en plus efficacement et donc permette par l'amélioration des conditions de vie et du bien-être une hausse de plus en plus rapide de la population. Or, ce n'est pas ce que nous observons dans l'exemple français.

1. Le taux de retour énergétique : une tentative d'explication du « rendement démographique » décroissant de l'énergie

Pour expliquer ce phénomène nous allons mobiliser une notion propre au domaine énergétique mais encore inappliquée au domaine démographique. Il s'agit du taux de retour énergétique (TRE), un indicateur créé par l'économiste américain Charles A. S en 1984 qui vise à mesurer la « qualité » de chaque source d'énergie. Son calcul repose sur la formule suivante :

$$\text{TRE} = \frac{\text{énergie extraite}}{\text{énergie dépensée}}$$

Il s'agit d'un ratio, donc d'un indicateur sans unité, qui mesure le rendement d'une source d'énergie. Si le ratio est supérieur à 1, cela signifie que la source d'énergie étudiée permet de récupérer plus d'énergie que le montant qu'on a investi initialement.

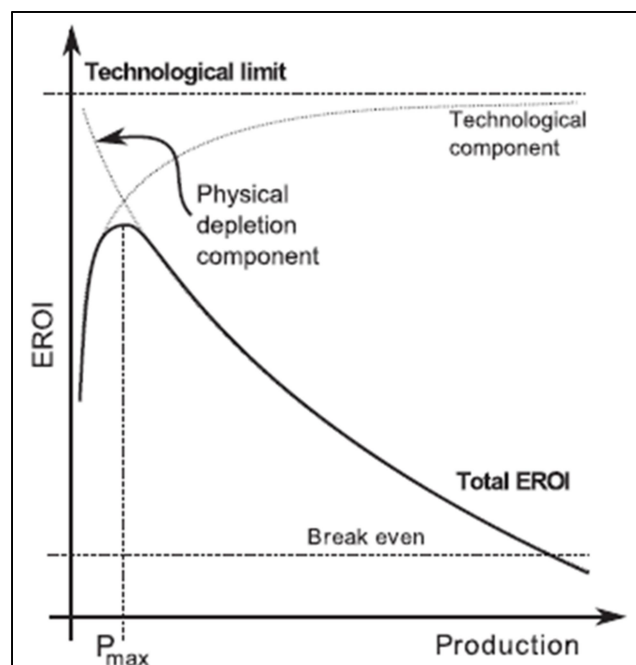


Figure 32 : Evolution théorique du TRE d'une source d'énergie (source : Dale et al. 2011, page 7098)

Le TRE d'une source d'énergie suit en théorie l'évolution présentée sur la figure 32. Il est élevé au début de l'exploitation d'une ressource et s'affaiblit au cours du temps. Par exemple, le charbon extrait au début de la révolution industrielle était facilement accessible, les mines étant peu profondes et fortement concentrées. Au fur et à mesure du temps, les mines sont devenues de plus en plus difficiles d'accès, et le charbon extrait de moins bonne qualité. De fait son extraction est devenue de plus en plus coûteuse en énergie.

Ce coût « réel » de l'énergie, exprimé en termes énergétiques et non plus monétaires permet d'appréhender plus facilement la relation entre énergie et développement des sociétés humaines. Plus concrètement, on peut représenter les besoins énergétiques des sociétés sous la forme d'une pyramide, comme celle présentée en 1943 par Abraham Maslow.

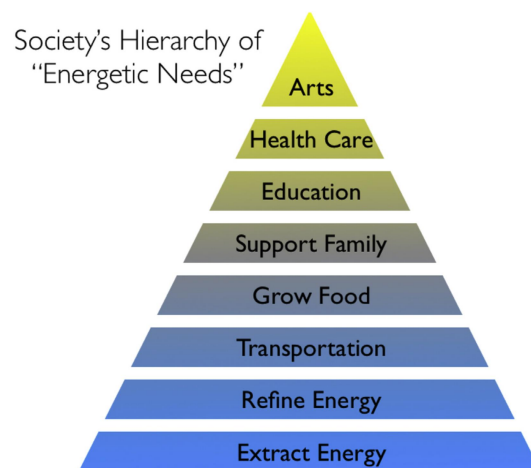


Figure 33: Pyramide des besoins énergétiques des sociétés humaines (source : Lambert et al. 2014, page 164)

Au niveau d'une société, la pyramide des besoins énergétiques explique que les premières unités d'énergies seront consacrées à extraire de l'énergie de l'environnement, puis si ce besoin est satisfait, la société cherchera ensuite à satisfaire le besoin de « raffinage » de cette énergie, puis de son transport, etc... pour finir par les besoins d'éducation, de santé et de culture. En d'autres termes c'est l'extraction d'énergie qui permet une forte amélioration des conditions de vie et une poussée démographique importante. A l'inverse, l'énergie de faible

qualité nous oblige à « sacrifier » notre capacité de reproduction ce qui ralentit donc la croissance démographique.

2. Qui du drame ou de la tragédie décrira le mieux les évolutions démographiques humaines ?

L'introduction de la notion de TRE nous a permis d'expliquer pourquoi nous observons un rendement démographique décroissant. Cependant nous n'avons toujours pas tranché entre nos hypothèses « tragique » et « dramatique ». Pour rappel la première suppose que rien ne peut être entrepris pour modifier notre destin démographique, ce dernier étant déterminé irrémédiablement par l'évolution du TRE de l'énergie consommée.

La seconde explique que l'on peut échapper à ce destin démographique. En effet, on pourrait peut-être observer une période où malgré un TRE élevé une population choisit de ne pas croître aussi rapidement que le lui permettraient les conditions « physiques ». Inversement on pourrait aussi envisager une situation où malgré un TRE faible une population continue de croître de manière importante en choisissant de sacrifier un autre de ses besoins primaires (baisse du niveau de revenu, de la consommation de nourriture ...).

Nous avons tendance à privilégier l'hypothèse de la tragédie à l'instar de Durkheim qui définissait notamment le fait social par sa caractéristique d'être historiquement stable. De fait, bien que notre étude se limite au seul cas français nous avons observé 3 à 4 cycles démographiques suivant le modèle du rendement démographique décroissant qui semblaient liés à l'apparition de nouvelles sources d'énergie. Or, de telles récurrences qui n'étaient en rien garanties nous conduisent à penser que les évolutions démographiques suivent un schéma global, prédéfini et collectif. Il convient cependant de multiplier le nombre d'expériences sur des pays et des périodes variées afin de voir si ce lien se maintient en tout temps et en tout lieu malgré les variations culturelles, sociétales et économiques.

3. Conforter la tragédie ou la nécessité de poursuivre les recherches avec de nouveaux pays

Comme évoqué précédemment multiplier le nombre d'expériences est primordial. Pour invalider l'hypothèse tragique il suffit d'un exemple montrant une dé-corrélation totale ou

partielle entre consommation d'énergie et évolution démographique. *A fortiori* ne pas observer une telle dé-corrélation ne signifierait pas pour autant que l'hypothèse de la tragédie est vraie. On ne peut prouver l'absence. On peut néanmoins fortement diminuer le risque d'un faux positif.

À ce jour et dans l'optique de poursuivre nos recherches nous disposons déjà d'une base de données concernant plusieurs pays européens, africains et asiatiques concernant les consommations et productions de pétrole de de charbon, parfois depuis le XIXème siècle. Nous souhaiterions finalement introduire un des pays présents dans cette base de données et qui nous semble suivre le schéma français. Il s'agit de l'Ethiopie, que certains considèrent comme le cas emblématique du pays dépassé par sa croissance démographique incontrôlée. En effet ce pays a multiplié sa population par 3 en seulement 40 ans.

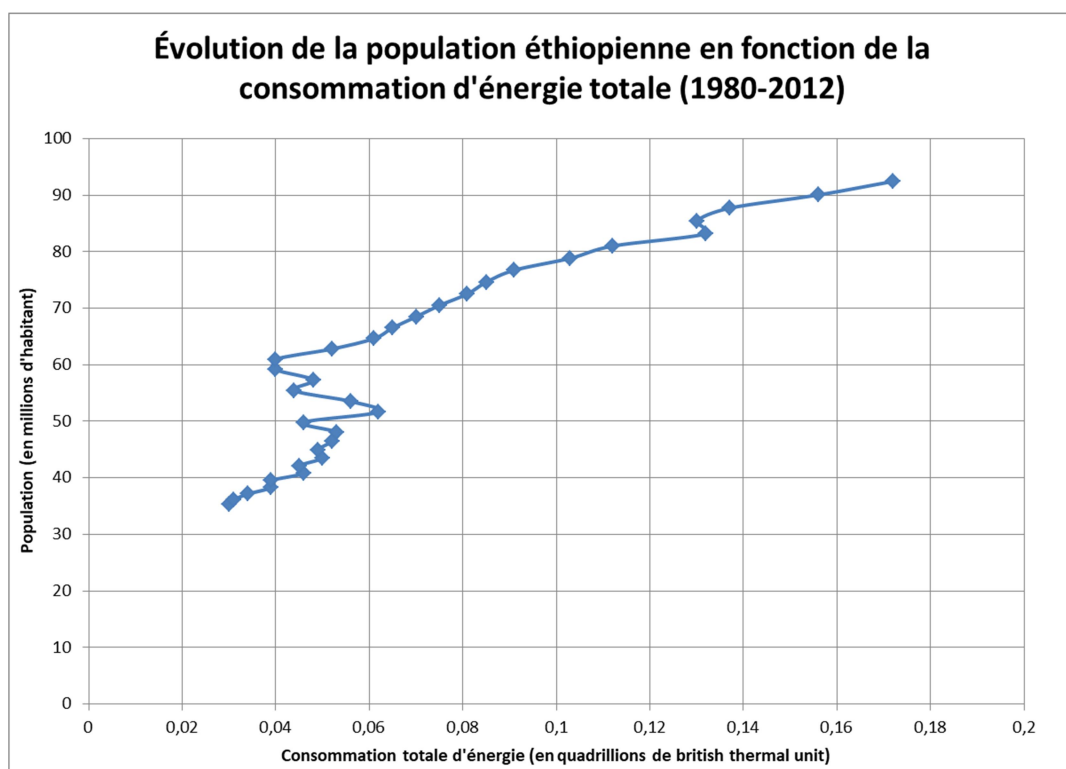


Figure 34: Evolution de la population éthiopienne en fonction de la consommation d'énergie totale

Ainsi on observe sur un pays culturellement et géographiquement éloigné et avec un niveau de richesses bien inférieur, un lien entre énergie et population très similaire à ce qui a pu être observé pour le cas français. On note en particulier que ce pays présente le même « rendement démographique » décroissant. Il reste à démontrer cependant que dans ce cas aussi c'est bien l'énergie qui cause de manière unilatérale la population.

L’Ethiopie est un cas intéressant auquel appliquer notre modèle d’explication. En effet, ce que négligent les autres modèles démographiques c’est que pendant que l’Ethiopie multipliait sa population par 3 elle augmentait dans le même temps sa consommation d’énergie par 5. En d’autres termes l’Ethiopie avait « les moyens énergétiques » d’augmenter sa population. On est donc bien loin de la perspective malthusienne stigmatisant la fécondité incontrôlée des classes les plus pauvres alors que dans le même temps ils n’auraient pas les moyens de subvenir aux besoins de leur progéniture.

On peut également s’intéresser à l’exemple du Japon. Ce pays présente la situation encore relativement rare, d’un déclin démographique prononcé au cours de la période récente : sa population a en effet décliné de 1,5 millions d’habitants depuis 2010. Ce qui est intéressant est que même dans ce cas de déclin démographique, on peut observer un pic de la consommation d’énergie qui le précède de quelques années. Le Japon étant un pays industrialisé à forte tradition exportatrice, on peut penser que le biais dû aux « importations » est moins présent sur la période récente que pour le cas français.

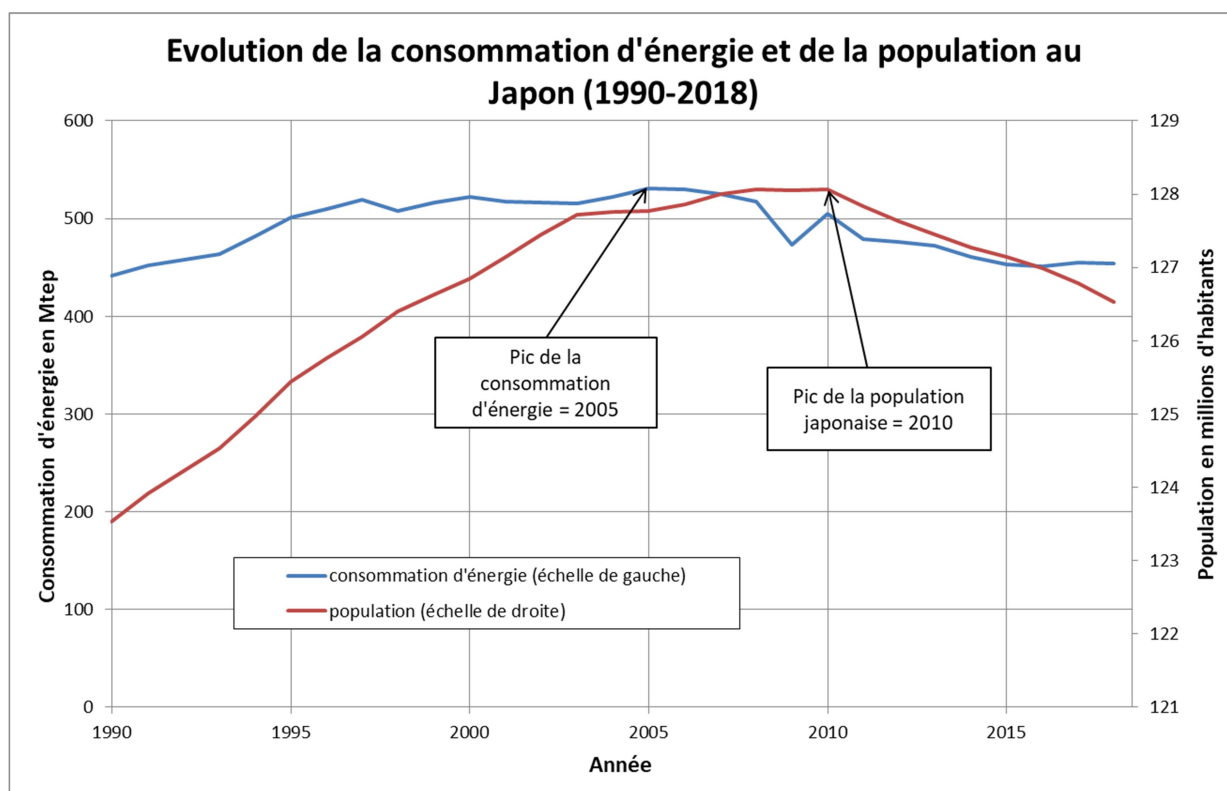


Figure 35 : évolution de la population et de la consommation d'énergie au Japon (source BP et Banque Mondiale)

Il pourrait donc être intéressant d'observer de manière statistique si la relation causale de l'énergie vers la population se maintient dans des situations de déclin. Cela pourrait éclairer à la fois la situation européenne, qui connaît un marasme démographique depuis de nombreuses années déjà, mais également des situations historiques comme l'effondrement de l'empire maya au XI^e siècle ou de l'empire romain à la fin du V^e siècle (effondrements à la fois démographiques et économiques). En effet l'empire romain connaît son apogée démographique au II^e siècle avec 75 millions d'habitants. Le même ensemble géographique en l'an 650 ne compte plus que 37 millions d'âmes (Grandazzi 2019). L'empire Maya quant à lui semble avoir connu une forte expansion démographique entre le Xe et XIe siècle en multipliant sa population par 5 avec une apogée à 10 millions d'habitants, (Wright 2008, Salomon 2009) avec qu'elle ne s'effondre de moitié par la suite. Notre thèse portera donc une attention particulière à l'étude des cas récents de déclin démographiques et leurs implications sociales et économiques à court et moyen terme.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Au terme de notre développement nous avons pu voir que, pour l'exemple français, un lien de causalité entre consommation d'énergie et évolution démographique était bien présent.

Les différentes expériences menées ont montré en effet que l'énergie causait de manière unilatérale et positive la population et que ce lien était statistiquement significatif et stable au cours du temps. Ce lien de causalité ne semble pas avoir été envisagé par la littérature économique existante qui a vu en général la consommation d'énergie et de ressources comme une conséquence des évolutions démographiques. Néanmoins il semble également que les sources d'énergies n'ont pas un « pouvoir » démographique similaire et que ce pouvoir varie au cours du temps. Une des explications à ces variations pourrait résider dans la notion de taux de retour énergétique qui permet d'évaluer la qualité énergétique de chacune des sources d'énergie disponibles.

L'existence de ce lien de causalité non anticipé nous conduit à proposer une série d'hypothèses.

Nous avons identifié deux explications possibles à ce phénomène : l'une fondée sur un destin démographique, l'autre fondée sur un choix collectif. En effet l'apparition de nouvelles sources d'énergie permet dans un premier temps d'améliorer les conditions de vie, les individus faisant ainsi le « choix » de procréer davantage et de vivre plus longtemps. Dans cette hypothèse l'énergie apparaît comme la cause nécessaire mais non suffisante à la croissance démographique. La seconde hypothèse emprunte au fait social durkheimien l'idée qu'au niveau collectif les évolutions démographiques ne sont pas dictées par les choix individuels mais par une tendance statistique stable. En d'autres termes l'augmentation démographique qui suit la consommation d'énergie est en fait nécessaire et attendue pour extraire cette énergie. Les sociétés humaines n'ont donc pas le choix quant à leur destin démographique.

Pour trancher entre ces deux hypothèses, davantage de recherches sont nécessaires en observant le comportement de ces deux variables dans d'autres pays et sur des périodes historiques variées. Les données que nous avons collectées jusqu'à ce jour et qui couvrent un large panel de pays semblent montrer que cette relation causale reste vraie même dans des pays très différents comme l'Éthiopie.

Notre projet de thèse vise donc à généraliser nos tests de causalité à une trentaine de pays, principalement des pays développés en raison de la présence de données sur longue période mais aussi marginalement en étudiant des pays émergeant ou en développement.

Multiplier les observations sur des pays différents nous permettrait dans un premier temps, par l'utilisation des méthodes de l'analyse exploratoire des données (Analyse en composantes principales, analyses Factorielles) de définir une typologie de pays en fonction de leur réaction à un afflux d'énergie. On peut par exemple supposer que l'Arabie saoudite en raison de ses ressources pétrolifères locales réagit démographiquement de manière plus forte à une augmentation de la consommation de pétrole que la France qui doit intégrer le coût du transport de cette énergie. Ce transport dégrade ainsi le « TRE » démographique du pétrole en France.

Dans un second temps, nous prévoyons de détecter les points de rupture dans nos séries temporelles grâce à la méthode des points atypiques (ou méthode des outliers). Cela permettrait ainsi d'identifier de manière plus précise les périodes de « transitions énergétiques » entre différentes sources d'énergies et leurs effets démographiques respectifs.

Le fait de disposer d'un plus grand nombre d'observations sur diverses périodes ou sous périodes ainsi définies, permet aussi d'envisager l'utilisation de la méthode des données de panels.

Le projet de thèse viserait donc à approfondir le travail effectué au cours de ce mémoire de recherche en analysant cette relation de causalité sur un plus grand nombre de pays sur longue période grâce à des outils statistiques variés.

Dans le cas où l'exemple français serait un cas unique, c'est-à-dire dans le cas où on n'identifierait pas de relation causale de l'énergie vers la population dans tous les autres pays étudiés, l'objectif sera alors d'étudier le cas particulier français et de tenter d'apporter une explication à cette relation unique. De même s'il se dégage des recherches deux groupes de pays, l'un présentant cette relation causale et l'autre non, nous nous intéresserons aux spécificités de chacun des deux groupes.

A cette fin, nous collecterons des données plus variées en particulier concernant le volet démographique (état de la population, nombre de morts, nombre de naissance, solde migratoire...), et énergétique (consommation et/ou production des différentes sources d'énergie). Dans l'idéal, la base de données serait constituée à partir des annuaires statistiques

des différents pays étudiés. Le recours à des sources secondaires sera aussi envisagé (publication internationales, entreprises privée, base de données d'autres chercheurs...).

Enfin notre projet de thèse, en visant à mieux comprendre les déterminants énergétiques de la croissance démographique, a également pour but de construire et d'affiner des modèles de prévision démographiques intégrant notamment les limites posées par la disponibilité de certaines ressources. Cette thèse sera également l'occasion de mieux comprendre les phénomènes d'effondrement démographique, leur impact et leur violence supposée. Elle aura également des implications concernant les politiques d'aide au développement, en replaçant au centre des attentions la politique énergétique pour les pays qui auront été identifiés comme présentant un lien fort entre démographie et consommation d'énergie. Enfin, dans le prolongement de son orientation cliométrique cette thèse aura à cœur de proposer un nouvel outil d'analyse et de modélisation aux sciences historiques en permettant de lier production d'énergie (surface agricole, surface des villes) et population, en particulier dans l'étude des sociétés antiques où l'une des deux informations est parfois manquante ou en débat.

Table des matières

Remerciements :	2
Introduction	3
I. Revue de littérature :	6
1. À l'origine de la science économique : une vision négative du lien entre croissance de la population et développement économique	7
2. La démographie comme grand revirement de jurisprudence pour la science économique : la mise en avant de ses aspects positifs pour le développement.....	10
3. De l'optimisme démographique à la crainte écologique: le tournant des années 1990 où comment l'économie cherche à mieux comprendre les évolutions de population	12
4. L'importance de l'énergie pour la croissance économique : un complément à la théorie de la croissance unifiée ?	17
II. Base de données :	24
1. Les données démographiques.....	24
2. Les données énergétiques.....	29
2.1. Production et consommation de charbon.....	29
2.2. Consommation de pétrole.....	31
2.3. Production d'hydroélectricité :	32
2.4. Consommation de gaz naturel :	34
2.5. Production électronucléaire :	35
2.6. Production d'électricité renouvelable :	37
3. Mise en relation des données.....	37
III. Méthodologie :	44
1. Description du modèle VAR	44
2. Conditions nécessaires pour le modèle VAR et le test de Granger	46
3. Modèle VAR et analyse dynamique.....	49
IV. Résultats :	50
1.1 Etude de la causalité entre charbon et population entre 1827 et 1939.....	50
1.2. Interprétation des résultats.....	54
2.1. Etude de la relation entre population et autres sources d'énergies.....	55
2.2 Interprétation des résultats.....	60
3.1 Etude de la relation entre population et consommation d'énergie totale.....	62
3.2. Interprétation des résultats.....	66
4.1 Etude de la relation entre variables énergétiques (présentation des relations causales).....	69

4.2 Etude de l'intensité des différentes relations causales.....	72
V. Discussion des résultats.....	76
1. Le taux de retour énergétique : une tentative d'explication du « rendement démographique » décroissant de l'énergie.....	78
2. Qui du drame ou de la tragédie décrira le mieux les évolutions démographiques humaines ? .	80
3. Conforter la tragédie ou la nécessité de poursuivre les recherches avec de nouveaux pays	80
Bibliographie :.....	89
Sommaire des figures:.....	95
Sommaire des schémas:.....	97
Sommaire des tableaux :.....	97
Annexes:.....	98

Bibliographie :

- Aghion, P. & Howitt, P., (1998). *Endogenous Growth Theory*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Annuaire Statistique de la France (1878-2007)
- Arthur, W.B., McNicoll, G. (1975). “Large-Scale Simulation Models in Population and Development: What Use to Planners?”, *Population Devel. Rev.*, 1(2), pp. 251-65.
- Asheim, G.B. (1994). “Net National Product as an Indicator of Sustainability”, *The Scandinavian Journal of Economics*, 96(2), pp. 257-265.
- Auzanneau, M. (2015). *Or noir: La grande histoire du pétrole*. Paris: La Découverte.
- Ayres, R. and B. Warr (2005) Accounting for Growth: the Role of Physical Work. *Structural Change and Economic Dynamics*, 16: 181-209
- Becker, G. S. (1991). *A Treatise on the Family*, Harvard University Press
- Bély, L. (2009). Chapitre XII. Vivre au XVII^e siècle : les données démographiques et économiques. Dans, L. Bély, *La France au XVII^e siècle: Puissance de l'État, contrôle de la société* (pp. 335-349). Presses Universitaires de France.
- Bérenger, J. (1980). Chapitre I - L'essor économique du seizième siècle. Dans : Georges Livet éd., *Histoire générale de l'Europe (2): L'Europe du début du XIV^e siècle à la fin du XVIII^e siècle* (pp. 203-227). Presses Universitaires de France.
- Bordes, J.-L. (2010). “Les barrages en France du XVIII^e à la fin du XX^e siècle”, *Histoire, évolution technique et transmission du savoir. En première ligne*, 70
- Boulier, B. L. (1984). “What Lies Behind Verdoorn's Law?”, *Oxford Econ. Pap.* 36(2), pp. 259-67.
- Brander A.J., Dowrick S. (1994). “The role of fertility and population in economic growth: Empirical results from aggregate cross-national data”, *Journal of Population Economics* 7:1-25
- Brekke, K.A. (1994). “Net National Product as a Welfare Indicator”, *The Scandinavian Journal of Economics*, 96(2), pp. 241-252.
- British Petroleum, *Annual Statistical Review of World Energy 1965-2018*
- Caldwell, W.J. (1976). “Toward a restatement of demographic transition theory”, *Population and Development Review* 2: 321–366.

- Charbit, Y. & Gaimard, M. (2015). Chapitre 1. Les catastrophes démographiques du passé. Dans Y. Charbit & M. Gaimard (Dir), *La bombe démographique en question* (pp. 19-61). Presses Universitaires de France
- Clark, C. (1967). *Population Growth and Land Use*. London: Macmillan.
- Clark, G., and G. Hamilton. (2006). “Survival of the richest”. *Journal of Economic History* 66: 707–736.
- Coale, A. J., Hoover, E. M. (1958). *Population growth and economic development in low-income countries*. Princeton, NJ: Princeton U. Press.
- Cohen J. E., (1996). *How many people can the earth support?* Norton and company, New York, 532 p.
- Commissariat général au développement durable (2019). *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*. Ministère de la transition écologique et solidaire.
- Cour des comptes (2012). *Les coûts de la filière électronucléaire*. Rapport public thématique
- Court,V., (2016). *Energy, EROI, and Economic Growth in a Long-term Perspective*. Ph.D thesis, Université Paris Nanterre
- Corniou, J.-P. (2018). *L’avenir de l’hydroélectricité*. Fondation pour l’Innovation Politique.
- Dale, Michael, Susan Krumdieck, et Pat Bodger. (2011). “Net Energy Yield from Production of Conventional Oil”, *Energy Policy* 39 (11): 7095-7102.
- Dandekar, V. M., and N. Rath. (1971). *Poverty in India*. Pune, India: Indian School of Political Economy
- Dasgupta, P. (1995). “The Population Problem: Theory and Evidence”, *Journal of Economic Literature*, Vol. 33, No. 4, pp. 1879-19
- Deniau C., Fiori G., Mathis A. (1992). “Sélection du nombre de retards dans un modèle VAR : conséquences éventuelles du choix des critères”, *Économie & prévision*, n°106. Développements récents de la macro-économie. pp. 61-69.
- Dickey D. A, Fuller A. (1979). “Distribution of the estimators for autoregressive time series with unit root”, *Journal of the American Statistical Association*, 74, p. 427-431.
- Diebolt, C. (2001). *L’Association Française de Cliométrie*, <https://cliometrie.org/>
- Dumont, G-F. (2000). “La population de la France au XXe siècle : un bilan extraordinairement contrasté”, *Population et avenir*, Association Population et Avenir, pp.4-9

- Durand, B. (2018). *Petroleum, Natural Gas and Coal: Nature, Formation Mechanisms, Future Prospects in the Energy Transition*. EDP Sciences
- Durlauf, S. N., Kourtellos, A. and Minkin, A. (2001). “The local Solow growth model”, *European Economic Review* 45, pp. 928-940
- Eckstein Z., Schultz T. P., Wolpin K. (1984). “Short-run fluctuations in fertility and mortality in pre-industrial Sweden”, *European Economic Review*, 26, 3, p. 295-317.
- EDF (2018). “Le nucléaire en chiffres”, *Tout sur l'énergie*.
- Elliott G., Rothenberg T. J., Stock J. H. (1996). “Efficient tests for an autoregressive Unit Root”, *Econometrica*, 64, p. 813-836.
- Fang, Z., Chen, Y. (2017). “Human capital and energy in economic growth – Evidence from Chinese provincial data”. *Energy Economics*, Elsevier, vol. 68(C), pages 340-358
- Farooq, G. Ekanem, I. I. and Ojelade, S. (1987). Family Size Preferences and Fertility in South-Western Nigeria. Dans *Sex roles, population and development in West Africa*. Eds. CHRISTINE OPPONG. London: James Currey, pp. 75-85.
- Foreman-Peck, J. (2019). “Economic-Demographic Interactions in the European Long Run Growth”, *Handbook of Cliometrics*
- Galor O. (2008). “Human Capital, Fertility and Growth”, dans Palgrave Macmillan (eds) *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan, London
- Galor, O., and D.N. Weil. (1999). “From Malthusian stagnation to modern growth”, *American Economic Review* 89: 150–154.
- Galor, O., and D.N. Weil. (2000). “Population, technology and growth: From the Malthusian regime to the demographic transition and beyond”, *American Economic Review* 110: 806–828.
- Galor, O. (2005). “From stagnation to growth: unified growth theory”, *Handbook of Economic Growth*. vol. 1A. North Holland, Amsterdam, pp. 171–294
- GIEC (2014). “Résumé à l'intention des décideurs”, *Changements climatiques, L'atténuation du changement climatique*. Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- George, P. (1958). “Problèmes géographiques de la production et de la consommation du gaz naturel”, *L'information géographique*, volume 22, n°1, pp. 1-7

- Gillaumat-Taillet, F. (1987). “La France et l'énergie nucléaire : réflexions sur des choix”, *Observations et diagnostics économiques* : revue de l'OFCE, n°19, pp. 189-227
- Giraud, G. and Z. Kahraman (2014). *How Dependent is Growth from Primary Energy? The Dependency Ratio of Energy in 33 Countries (1970-2011)*. Working document from the Centre d'Economie de la Sorbonne.
- Giraud, G. (2015). “Energy Challenges for Sustainable Development: How to Avoid a Collapse ? ”, *Revue d'économie du développement*, vol. 23(HS), 5-17
- Grandazzi, A. (2019). “Du nouveau sur la chute de Rome”, *Commentaire*, numéro 167(3), 675-677.
- Hall, Charles A. S., et Kent A. Klitgaard. (2012). *Energy and the Wealth of Nations: Understanding the Biophysical Economy*. New York, NY: Springer Verlag.
- Hanck, C., Arnold, A., Gerber, A., Schmelzer, M. (2019). *Introduction to Econometrics with R*. University of Duisburg-Essen. Open Minded.
- Hartwick, J.M. (1990). “Natural resources, national accounting and economic depreciation”, *Journal of Public Economics*, 43(3), pp. 291-304.
- Hazan, M., and B. Berdugo. (2002). “Child labor, fertility and economic growth”, *Economic Journal* 112: 810–828.
- Herrerias, M.J., Joyeux, R., Girardin, E., (2013). “Short- and long-run causality between consumption and economic growth: evidence across regions in China”, *Appl. Energy* 112, 1483–1492.
- Hicks, J. R. (1939). *Value and capital*. Oxford: Clarendon.
- Holdren, J.P. (1991). “Population and the energy problem”, *Popul Environ* 12, 231–255.
- Huang, B.N., Hwang, M.J., Yang, C.W. (2008). “Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: a dynamic panel data approach”, *Ecological Economics*, 67.
- Jaoul, M. (2004). *Economie de l'enseignement supérieur en France. Une analyse cliométrique*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 1.
- Jaoul-Grammare, M. et Perrin, F. (2017). “A Gendered Approach of Economic and Demographic Interactions: Evidence from France”, *Revue d'Economie Politique* 127 (6)
- Jones, C.I., (1998). *Introduction to Economic Growth*, New York, NY: W.W. Norton.

- King, E.M. (1985). *Consequences of Population Pressure in the Family's Welfare*. Background paper prepared for the Working Group on Population Growth and Economic Development, Committee on Population, National Research Council, Washington, D.C.
- Kremer, M. (1993). "Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990", *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 108, No. 3, pp. 681-716
- Laleu, V., Piton H. (2005). "L'hydroélectricité en France", *Géologues*, vol. 145
- Lambert, J.G., Hall C.A.S., Balogh, S., Gupta, A., et Arnold, M. (2014). "Energy, EROI and Quality of Life", *Energy Policy* 64: 153-67.
- Liew, V, K-S., (2004). "What lag selection criteria should we employ?", *Economics Bulletin*, 33(3), pp. 1-9.
- Lutz, W. et al. (2014) *9 billion or 11 billion? The research behind new population projections*. Nexus, IIASA
- Magalhães, N., Fressoz, J-B., Jarrige, F., Levillain, G., Lyautey, M., et al. (2018). *L'économie matérielle de la France (1830-2015). L'histoire d'un parasite ?* Working Paper
- Malthus TR. (1798). *An Essay on the Principle of Population*. Amherst, NY: Prometheus Books; 1798.
- Mamelund, S. (2004). "La grippe espagnole de 1918 est-elle responsable du baby-boom de 1920 en Norvège : Le cas d'un pays neutre", *Population*, vol. 59(2), 269-302.
- Meadows D. H., Meadows, D. L., Jorgen R. W. (1972). *The limits to growth*. Universe Books ISBN 0-87663-165-0
- Moav, O. (2005). "Cheap children and the persistence of poverty", *Economic Journal* 115: 88–110.
- National Research Council (1986). *Population Growth and Economic Development: Issue and Evidence*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Pison, G. (2012). "France-Allemagne: histoire d'un chassé-croisé démographique", *Population et Sociétés* 487.
- Pison, G. (2015) "France/Royaume-Uni : stabilité démographique sur le continent, stop and go outre-Manche", *Population et Sociétés* 520.
- Roux, S. (2015). *Approches structurelles et non structurelles en micro-économétrie de l'évaluation des politiques publiques*. Banque de France Working Paper No. 565

- Salanié, B. (1999). “*Guide pratique des séries non-stationnaires*”. Économie et prévision, 137, 1. p. 119-141.
- Salles, R., Ogasawara, E., Porto, F., Belloze, K., González, S., Pedro, H. (2018). “Nonstationary time series transformation methods: An experimental review”, *Knowledge-Based Systems* 164, pp. 274-291.
- Salomon, J-N. (2009). “Le déclin de la civilisation classique Maya : explications”, *Les Cahiers d’Outre-Mer*, 246, pp. 143-173.
- Shahbaz, M., Khan, S., Tahir, M.I., (2013). “The dynamic links between energy consumption, economic growth, financial development and trade in China: fresh evidence from multivariate framework analysis”, *Energy Econ.* 40, 8–21.
- Shakouri G. H., Menhaj, M. (2008). “A Systematic Fuzzy Decision-Making Process to Choose the Best Model Among a Set of Competing Models”. *Systems, Man and Cybernetics*, 1118-1128
- Sims, C. A. (1980). “Macroeconomics and reality”, *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 1-48.
- Soytaş, U., Sari, R., (2006). “Can China contribute more to the fight against global warming?”, *J. Policy Model* 28, 837–846.
- Sundrum R. M. (1987). “Population Growth and Economic Development: Issues and Evidence”, *Population and Development Review*, Vol. 13, No. 3, pp. 541-546
- Zhang, X.P., Cheng, X.M., (2009). “Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China”, *Ecol. Econ.* 68 (10), 2706–2712.
- Veyret-Verner, G. (1961). “Electricité et Gaz en France de 1952 à 1960”, *Revue de Géographie Alpine*. 49-3, pp. 401-431
- Whalley, J., Zhao, X., (2013). “The contribution of human capital to China's economic growth”. *China Econ. Policy Rev.* 2 (01), 1350001.
- World Energy Council (2013). *World Energy Resources*.
- Wright, R. (2008). “La fin du progrès : les leçons de l'archéologie”, dans : Jean-Paul Demoule éd., *L'avenir du passé: Modernité de l'archéologie* (pp. 62-73). Paris: La Découverte.

Sommaire des figures:

Figure 1 : Evolution de la population et des ressources selon deux modes de progression (calcul de l'auteur)	8
Figure 2 : niveau de population, de PIB et de taux d'urbanisation pris en compte dans les différents scénarios d'émissions de CO ₂ (source Lutz 2016)	16
Figure 3 : élasticité du capital, du travail et de l'énergie aux États-Unis 1900-2000 (source : Ayres et Warr 2005)	19
Figure 4 : Résultats des tests de causalités entres sources d'énergie et PIB (source : Fang et al. 2017).....	21
Figure 5 : évolution de la population en France entre 1827 et 2017 (source : Annuaire Statistique et Banque Mondiale)	24
Figure 6 : évolution de la population en France corrigée des évolutions territoriales	26
Figure 7 : évolution du taux de natalité et du taux de mortalité en France entre 1800 et 2010 (source : Pison 2012).....	28
Figure 8 : Production et Consommation de charbon (sources diverses)	29
Figure 9 : Consommation de pétrole (source Annuaire Statistique & BP)	31
Figure 10 : Production d'hydroélectricité (source : Annuaire Statistique & BP)	32
Figure 11 : Consommation de gaz naturel en France (source : Annuaire Statistique & BP)...	34
Figure 12 : Pic de production de gaz naturel en Europe (source : BP)	35
Figure 13 : Production thermonucléaire en France (source Annuaire Statistique & BP)	36
Figure 14 : Consommation d'énergie en France par type d'énergie	40
Figure 15 : évolution de la population française en fonction de la consommation d'énergie..	41
Figure 16 : différents cycles démographiques peut-être lié à l'apparition de sources d'énergie nouvelles.....	42
Figure 17 : décomposition de la consommation française d'énergie (en %)	43
Figure 18 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre entre l'empreinte carbone et l'inventaire national en 2014 (source : Commissariat général au développement durable).....	44
Figure 19 : Exemple d'un processus TS (à droite) et d'un processus DS (à gauche), source Salles 2018	47
Figure 20 : Evolution du taux d'intérêt à court terme (TB3MS) et à long terme (TB10YS) des bons du trésor américain à 10 ans (source Hanck 2019).....	48

Figure 21 : Test de causalité Production de Charbon-Population 1827-1939.....	51
Figure 22 : Décomposition de la variance des variables "SPOP" et "SCHARB"	52
Figure 23 : Test de causalité Consommation de Charbon-Population 1827-1939.....	53
Figure 24 : Décomposition de la variance des variables "SPOP" et "SCHARB"	53
Figure 25 : décomposition de la variance de la consommation de pétrole, de gaz et de la population.....	58
Figure 26 : Fonctions de réponses impulsionnelles de la consommation de pétrole, de gaz et de la population	59
Figure 27 : Rapport entre importation et extraction locale de flux physiques concernant la biomasse, les minéraux métalliques et non-métalliques ainsi que les vecteurs d'énergie fossile (source : Magalhães et al. 2018).....	63
Figure 28 : Excavation du charbon dans une mine à ciel ouvert en Russie	68
Figure 29 : Emission de CO ₂ en g/kWh par source d'énergie utilisée pour la production d'électricité	71
Figure 30 : réponses impulsionnelles des différentes variables du modèle VAR (1959-2017).....	75
Figure 31: Différents cycles démographiques suivant l'apparition de nouvelles sources d'énergie	77
Figure 32 : Evolution théorique du TRE d'une source d'énergie (source : Dale et al. 2011, page 7098).....	78
Figure 33: Pyramide des besoins énergétiques des sociétés humaines (source : Lambert et al. 2014, page 164).....	79
Figure 34: Evolution de la population éthiopienne en fonction de la consommation d'énergie totale	81
Figure 35 : évolution de la population et de la consommation d'énergie au Japon (source BP et Banque Mondiale).....	82

Sommaire des schémas:

Schéma 1 : Relations causales entre pétrole, gaz et population	57
Schéma 2 : Relation de causalité entre consommation d'énergie totale et population (1827-2017).....	64
Schéma 3 : chaîne de causalité entre charbon, gaz, pétrole et population	70

Sommaire des tableaux :

Tableau 1 : Taux de croissance annuel moyen de la population française au cours de différentes périodes	27
Tableau 2 : table de conversion entre différentes unités (source BP)	38
Tableau 3 : relations de causalité entre population, pétrole, gaz, nucléaire et hydroélectricité	56
Tableau 4 : Relations de causalité entre énergie et population	64
Tableau 5: Décomposition de la variance des trois modèles VAR étudiés entre 1827 et 2017	66
Tableau 6 : résultats des tests de causalité entre 1959 et 2017.....	70
Tableau 7: Décomposition de la variance du modèle VAR 1959-2017.....	73

Annexes:

Tableau A.1. Test de racine unitaire Elliot, Rothenberg et Stock (ERS)

période	Variable	Hypothèse nulle	Variables incluses dans l'équation testée	Statistique	Décision
1827-1939	charbon (consommation)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-2,57***	DS
	Scharb	Racine unitaire	Intercept	-10,12***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,84***	DS
	Spop	Racine unitaire	Intercept	-9,46***	Stationnaire
1827-1939	charbon (production)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-3,79***	TS
	Scharb	Racine unitaire	Intercept	-2,19**	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,84***	DS
	Spop	Racine unitaire	Intercept	-9,46***	Stationnaire
1863-1973	petrole	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,38***	DS
	Spetro	Racine unitaire	Trend+Intercept	-0,56***	DS
	Spetro2	Racine unitaire	Intercept	-16,63***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-0,80***	DS
	Spop	Racine unitaire	Trend+Intercept	-7,44***	TS
	Spop2	Racine unitaire	Intercept	-7,03***	Stationnaire
1928-1983	gaz (log)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,92***	DS
	Sgaz	Racine unitaire	Intercept	-6,41***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,72***	DS
	Spop	Racine unitaire	Intercept	-4,54***	Stationnaire
1923-2017	hydro	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,71***	DS
	Shydro	Racine unitaire	Intercept	-13,92***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,65***	DS
	Spop	Racine unitaire	Intercept	-5,85***	Stationnaire
1959-2017	nucleaire	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,63***	DS
	Snuke	Racine unitaire	Intercept	-1,71***	DS
	Snuke2	Racine unitaire	Intercept	-9,64***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,57***	DS
	Spop	Racine unitaire	Trend+Intercept	-6,14***	TS
	Spop2	Racine unitaire	Intercept	-6,06***	Stationnaire
1827-1975	energie (charbon+pétrole)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,34***	DS
	Sener	Racine unitaire	Trend+Intercept	-7,30***	TS
	Sener2	Racine unitaire	Intercept	-8,21***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-0,97***	DS
	Spop	Racine unitaire	Trend+Intercept	-8,48***	TS
	Spop2	Racine unitaire	Intercept	-8,14***	Stationnaire
1827-1990	énergie totale	Racine unitaire	Trend+Intercept	-0,89***	DS
	Sener	Racine unitaire	Trend+Intercept	-9,70***	TS
	Sener2	Racine unitaire	Intercept	-9,68***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-0,70***	DS
	Spop	Racine unitaire	Trend+Intercept	-8,88***	TS
	Spop2	Racine unitaire	Intercept	-8,51***	Stationnaire
1827-2017	energie totale	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,22***	DS
	Sener	Racine unitaire	Intercept	-10,88***	Stationnaire
	population	Racine unitaire	Trend+Intercept	-0,42***	DS
	Spop	Racine unitaire	Trend+Intercept	-9,54***	TS
	Spop2	Racine unitaire	Intercept	-9,09***	Stationnaire
1959-2017	Charbon (log)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-3,38**	TS
	Scharb	Racine unitaire	Intercept	-2,97***	Stationnaire
	population (log)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,38**	DS
	Spop	Racine unitaire	Trend+Intercept	-6,21***	TS
	Spop2	Racine unitaire	Intercept	-6,19***	Stationnaire
	Petrole (log)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,29***	DS
	Spetro	Racine unitaire	Trend+Intercept	-3,88***	TS
	Spetro2	Racine unitaire	Intercept	-3,86***	Stationnaire
	gaz (log)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-0,88***	DS
	Sgaz	Racine unitaire	Trend+Intercept	-7,41***	TS
	Sgaz2	Racine unitaire	Intercept	-1,97***	Stationnaire
	Hydro (log)	Racine unitaire	Trend+Intercept	-1,82***	DS
	Shydro	Racine unitaire	Intercept	-7,91***	Stationnaire

Tableau A.2. Sélection du retard optimal sur les modèles VAR utilisés

Période	variables du modèle VAR (dont population)	retard optimal pour chaque critère					Retard choisi
		LR	FPE	AIC	SC	HQ	
1827-1939	charbon (conso)	7	8	8	0	1	8
1827-1939	charbon (prod)	5	5	5	2	5	5
1863-1973	pétrole	6	6	7	1	1	6
1928-1983	gaz (log)	5	5	5	0	5	5
1923-2017	hydroélectricité	1	1	1	1	1	1
1959-2017	nucléaire	2	2	2	2	2	2
1827-1975	pétrole+charbon	15	1	1	1	1	1
1827-1990	énergie totale	15	1	1	1	1	1
1827-2017	énergie totale	1	1	1	1	1	1
1959-2017	énergie (désagrégée)	1	1	1	1	1	1

Tableau A.3. Tests de cointégration de Johansen sur différents échantillons

Période	Variables	Nombre Hypothétique d'équations de cointégrations	Eigenvalue	Trace statistics	Valeur critique 1%	Valeur critique 5%	Résultat
1827-1939	Charbon (conso)/ Population	0	0,11	12,62	20,04	15,41	Pas de cointégration
		1	0,00	0,34	6,65	3,76	
1928-1983	gaz(log)/ Population (log)	0	0,15	17,61	20,04	15,41	Pas de cointégration
		1	0,05	4,40	6,65	3,76	
1923-2017	Hydroélectricité/ Population	0	0,06	5,48	20,04	15,41	Pas de cointégration
		1	0,00	0,20	6,65	3,76	