

LES LIMITES ÉNERGÉTIQUES DE LA CROISSANCE

Jean-Marc Jancovici

Gallimard | *Le Débat*

2012/4 - n° 171
pages 80 à 95

ISSN 0246-2346

Article disponible en ligne à l'adresse:

<http://www.cairn.info/revue-le-debat-2012-4-page-80.htm>

Pour citer cet article :

Jancovici Jean-Marc, « Les limites énergétiques de la croissance »,
Le Débat, 2012/4 n° 171, p. 80-95. DOI : 10.3917/deba.171.0080

Distribution électronique Cairn.info pour Gallimard.

© Gallimard. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

Jean-Marc Jancovici

Les limites énergétiques de la croissance

Depuis quelques années, le terme de « transition énergétique » est de plus en plus fréquemment employé en Europe, essentiellement en conséquence des négociations sur le climat qui sont devenues une affaire importante dans les années 2000. Par la suite, un nombre grandissant de personnes l'ont également employé, tantôt pour désigner la baisse à venir de l'approvisionnement en pétrole puis en gaz, tantôt pour signifier le remplacement souhaité d'une partie du nucléaire par « autre chose » (objectif qui est soit neutre, soit antagoniste avec la lutte contre le changement climatique). De ce fait, il devient évident que les divers protagonistes qui utilisent cette expression ne lui donnent pas la même signification, ni en termes d'objectif, ni en termes de moyens, ni en termes de conséquences si elle se produit... ou si elle ne se produit pas.

Sans prétendre en rien à l'exhaustivité, le présent article donne quelques indications sur le contexte dans lequel toute réflexion sur notre avenir énergétique doit prendre place, à cause du lien très fort, mais mal connu, qui lie énergie et économie.

Tout d'abord, toute réflexion doit désormais se placer dans un contexte où il y aura de moins en moins de croissance économique.

Avant même toute attribution à une cause particulière, il est possible d'observer que la croissance annuelle moyenne du PIB par tête a évolué en baisse quasi constante depuis 1960 à l'échelle mondiale : elle a été de + 3,5 % par an (en moyenne) pendant les années 1960; de + 2 % par an (en moyenne) pendant les années 1970; d'un peu moins de + 1,5 % par an (en moyenne) pendant les années 1980, 1990 et 2000 (et nulle entre 2007 et 2010).

Mais les grandes zones qui composent le monde n'ont pas toutes évolué de la même manière. Le déplacement des activités productives vers l'Asie et les pays émergents hors Asie (Mexique, Brésil) a engendré une croissance par personne supérieure à la moyenne dans ces zones, et, de ce fait, si nous regardons l'Europe ou la France, nous y constatons une franche baisse au cours des cinq décennies qui viennent de s'écouler. Dans notre pays, la croissance du PIB par personne a été de 4,5 % par an pendant la

Jean-Marc Jancovici est consultant spécialisé dans les problèmes de l'énergie. Il vient de publier *Changer le monde : tout un programme!* (Calmann-Lévy, 2011). Dans *Le Débat* : « Climat, énergie : les impasses du futur » (n° 130, mai-août 2004), « Le mur de l'énergie rare » (n° 166, septembre-octobre 2011) et « Que signifie "sortir du nucléaire" ? » (n° 169, mars-avril 2012). Voir le site www.manicore.com.

décennie 1960-1970, 2,5 % par an pendant la décennie 1970-1980, un peu moins de 2 % par an pendant la décennie 1980-1990, un peu plus de 1,5 % par an pendant la décennie 1990-2000, et, enfin, d'environ 0,5 % par an sur les dix dernières années (et de 2007 à 2010 c'est - 1 % par an).

Depuis le deuxième choc pétrolier (1980), la France n'a *plus jamais connu une croissance du PIB par tête supérieure à 2 % par an*. L'évolution a exactement la même forme en « marches d'escalier descendantes » en Allemagne, en Italie, en Espagne, et dans nombre de pays occidentaux, les seules exceptions étant les pays à forte activité financière... avant la chute récente.

À ce propos, il faut rappeler que les hausses de prix des biens courants sont déduites de la croissance du PIB (on les requalifie en inflation), mais pas les hausses de prix des actifs (immobilier et actions notamment). Lorsque des actifs « physiquement identiques » (même nombre d'actions ou de mètres carrés) sont valorisés de manière fortement croissante, cette hausse vient alimenter de multiples façons la hausse du PIB (hausse du produit bancaire, des commissions d'intermédiaires, des impôts, etc.), puis sa baisse lorsque les bulles se dégonflent. Dit autrement, les bulles spéculatives sur l'immobilier ou les actifs financiers constituent une très bonne manière de faire monter le PIB tant qu'elles durent !

Il y a une raison « énergétique » (évoquée ci-après) à ce que la croissance aille désormais en ralentissant. De ce fait, le plus probable est que le taux de croissance annuel moyen du PIB par tête sera nul ou négatif pour la décennie 2010-2020 en France. *Tout plan économique qui nécessite, pour se réaliser, le retour à une « croissance durable » se terminera donc par une crise majeure, « non anticipée » par ceux qui regardent juste l'économie passée, mais parfaitement logique*

à cause du lien énergie-économie détaillé ci-dessous.

En particulier, si le flux d'investissements à réaliser dans les infrastructures de la « transition énergétique » doit simplement être un corollaire d'une croissance économique retrouvée, il ne se réalisera pas.

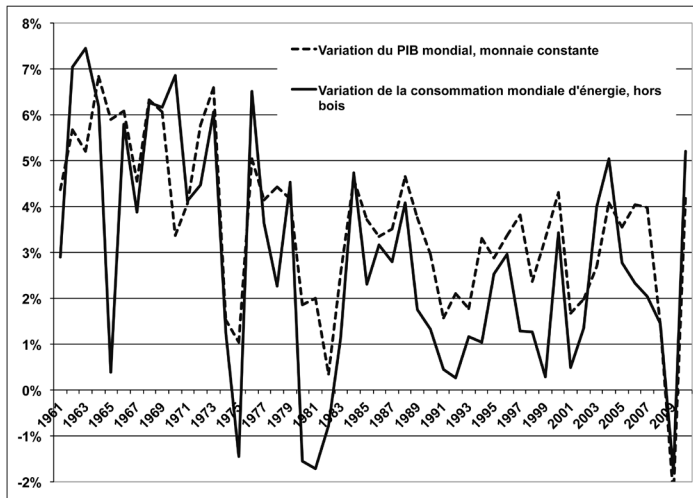
Cette évolution a une cause principale : le tassement de l'énergie disponible par personne.

L'économie classique, aujourd'hui dominante dans les analyses censées guider la construction des plans pour l'avenir, a théorisé la production comme résultant du capital et du travail. Avec cette vision, le PIB par personne évolue donc comme la quantité de travail disponible par personne, et le capital disponible par personne. À ce compte-là, le PIB « doit croître » si l'on favorise l'accès au travail – par exemple en baissant les charges – et l'accès au capital – par exemple en favorisant le crédit. Comme l'énergie n'existe pas dans cette équation (pas plus que les autres ressources naturelles), cette approche ne suggère pas que le PIB doive monter ou descendre en fonction de la quantité d'énergie disponible (ou des ressources naturelles disponibles). Or l'observation des statistiques montre pourtant que c'est bien cela qui se passe (*graphique 1*).

Le lecteur verra facilement qu'il y a une corrélation majeure entre l'énergie et le PIB, et la suite de ce texte va montrer que c'est en réalité une relation de cause à effet, le PIB étant aujourd'hui au premier ordre une fonction de l'énergie disponible ; et que de ce fait la variation future du PIB ne dépend désormais, en première approximation, que de la variation de la quantité d'énergie disponible.

Pourquoi ce rôle central de l'énergie ? Parce que, par définition même, l'énergie est la grandeur qui, en physique, caractérise la transforma-

Graphique 1



Variations respectives, depuis 1960, de la quantité d'énergie consommée dans le monde (pas du prix!), en trait plein, et du PIB mondial, en pointillé. Calculs de l'auteur sur sources diverses pour l'énergie, et World Bank 2012 pour le PIB. NB : la valeur pour 1965 sur la courbe pleine intervient lors d'une rupture de série et n'est probablement pas significative.

tion d'un système. Dès lors que l'on chauffe, refroidit, déplace, tord, extrude, lamine, grave, recouvre, coupe, soude, assemble, dissocie, etc., on a besoin d'énergie. Plus le flux manipulé est important, plus la quantité d'énergie mise en jeu est importante.

Or, notre système économique n'est rien d'autre que de la transformation à large échelle de ressources naturelles en « autre chose » (du sable en verre, des minerais en voitures, tables et couteaux, de la photosynthèse ou du pétrole en vêtements, etc.). L'apparition d'énergie à profusion a donc permis d'augmenter de manière faramineuse tous les flux physiques qui sous-tendent notre activité productive, et dont le PIB n'est que la traduction monétaire partielle.

Dit autrement, grâce à l'énergie, nous pouvons utiliser de plus en plus de machines qui chauffent, refroidissent, montent, descendent, extrudent, étirent, aplatissent, transportent, tordent, creusent, vident, pompent, transmettent, impriment, tissent, etc., avec une puissance considérablement plus importante que celle de nos bras et de nos jambes.

En passant du forgeron qui manie la masse au laminoir industriel actionné par l'électricité, ou du four à chaux artisanal de bord de mer à la cimenterie moderne, le flux de matière produit par personne a été augmenté d'un facteur supérieur à 1 000. Même dans les services nous retrouvons de tels multiples : un moteur de camion (le transport fait partie des services) est 4 000 fois

plus puissant que les muscles de son conducteur, et un employé de bureau du XXI^e siècle utilise, pour sa seule activité professionnelle, autant d'énergie pour son travail (fabrication de son informatique et de son bureau comprise) que ce qu'utilisait un Français des années 1950 pour l'ensemble de son activité, professionnelle et personnelle.

Même l'économie dite « dématérialisée » est donc fortement consommatrice de ressources transformées. Un autre exemple : fabriquer un ordinateur suppose la mise en route de flux physiques considérables – activités minières, métallurgie et industrie, production électrique pour alimenter des usines qui fabriquent les composants, transports intermédiaires, etc. – qui se produisent cependant hors des villes, et à l'étranger en ce qui nous concerne¹. Ces flux sont donc inaccessibles aux sens (toucher, odorat, ouïe, vision, goût) des urbains français, dont les économistes – et les dirigeants politiques – font partie. Ces derniers ont ainsi l'impression que la « dématérialisation » est une réponse à la contrainte sur les ressources, alors que l'examen physique montre qu'elle n'existe que dans un monde très consommateur d'énergie. Sans énergie à profusion on reviendrait aux livres de comptes sur du papier !

Pour formaliser ce qui précède, nous allons désormais exprimer le PIB non pas comme une fonction du capital et du travail, mais tout simplement comme le produit de deux termes : la *quantité* globale d'énergie utilisée, et l'*efficacité* de cet emploi de l'énergie (pour convertir des ressources en objets ou services). Nous pouvons même écrire une égalité stricte, qui est : $PIB = \text{énergie} \times (PIB/\text{énergie})$.

C'est le terme PIB/énergie qui désigne l'efficacité énergétique de l'économie : quand il croît, cela signifie que l'économie se « dématérialise »,

c'est-à-dire que l'on peut obtenir plus de PIB (en pratique, plus de biens et de services) pour une même quantité d'énergie. Or cette efficacité énergétique, en moyenne, évolue très lentement. Au niveau mondial, elle s'est améliorée de seulement 40 % en cinquante ans, entre 1960 et 2010, soit + 0,8 % par an en moyenne.

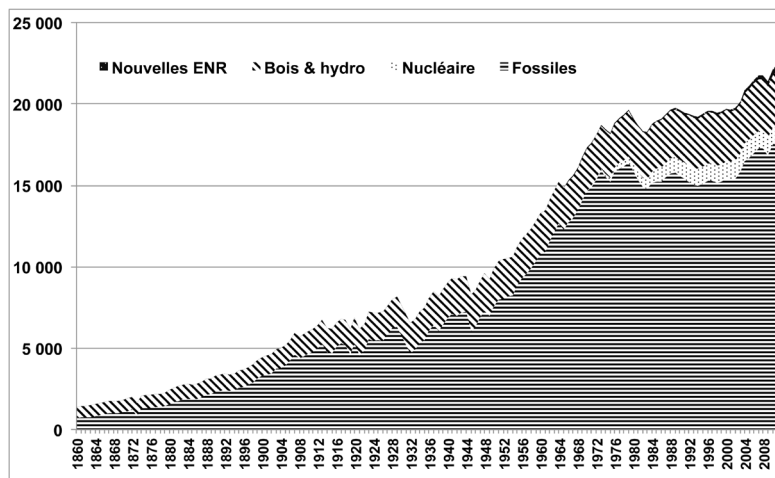
Continuons la démonstration en raisonnant par personne (car nul ne « voit » le PIB en son entier, tout le monde « voit » le PIB par personne). Comme précédemment, le PIB par personne est fonction de la même efficacité énergétique de l'économie, couplée cette fois avec la quantité d'énergie disponible par individu. Or l'énergie par personne, qui avait très rapidement augmenté depuis la fin du XIX^e siècle, a brutalement changé d'évolution après 1980 (*graphique 2*).

Les données montrent clairement que, au niveau mondial, l'énergie fossile reste reine (80 % du total), et que les « nouvelles renouvelables » sont insignifiantes (il faudrait qu'elles augmentent de 80 % par an pour compenser un déclin de 2 % par an du pétrole par personne, ce dont nous sommes proches). Les seules énergies non carbonées significatives sont la biomasse (10 % du total), l'hydroélectricité et le nucléaire (représentant chacun 5 % du total en équivalent primaire).

Ce graphique montre également que, après avoir crû au rythme de 2,5 % par an (3 % pour les énergies hors bois) pendant plus d'un siècle (de 1860 à 1980), la quantité d'énergie par personne a quasiment cessé d'augmenter depuis, se « tassant » à 0,4 % par an sur les trente dernières années. En fait, la variation a même été légèrement négative pour les économies matures,

1. En conséquence de quoi, fabriquer un ordinateur correspond à l'émission d'une tonne de CO₂, et consomme plusieurs milliers de kWh d'énergie.

Graphique 2



Consommation d'énergie primaire par personne et par an, en kWh. Éolien et autres renouvelables « nouvelles » correspondent à la toute petite aire noire du haut. Calculs de l'auteur sur sources diverses, 2012.

la hausse se concentrant pour l'essentiel dans les pays émergents (qui ont désormais pas mal émergé!).

La quantité d'énergie disponible par personne est donc passée d'une augmentation de 2,5 % par an avant 1980 à 0,4 % après 1980. L'efficacité énergétique, quant à elle, est restée positive, à environ 0,8 % par an, depuis 1970. De ce fait, le PIB par personne est brutalement passé, en 1980, d'environ 3 % de croissance annuelle à seulement 1,2 %, ce qui a « grippé » tout le système redistributif occidental, qui était calé sur une augmentation rapide des prélèvements obligatoires assis sur le PIB ou certaines de ses sous-composantes (salaires ou consommation).

En particulier, la dépense publique (les salaires des fonctionnaires et le nombre de ces derniers, budgets d'investissement, etc.), qui a été orga-

nisée avec un rythme d'augmentation de 3 % par an (ce qui permet, par exemple, de promettre des augmentations à l'ancienneté sans déficit public), a dû brutalement faire face à un défaut de recettes, et les chocs pétroliers ont correspondu à l'apparition, dans tous les pays industrialisés, et indépendamment de la couleur politique du pouvoir en place, d'un endettement croissant de l'État, mais aussi des ménages et des entreprises.

Les pouvoirs en place ont en effet favorisé l'accès au crédit pour faire repartir les investissements, pensant qu'ensuite le PIB suivrait. Mais sans énergie supplémentaire pour « donner à manger » aux nouveaux moyens de production, ce raisonnement s'est révélé invalide : le PIB n'est pas reparti, et la dette est restée. Sans croissance, elle finira par s'apurer au travers de l'inflation ou de crises plus violentes.

Ce lien énergie-économie est encore plus vrai pour le pétrole.

La mondialisation (et l'étalement urbain) a rendu tout le système économique très dépendant du transport. Or 98 % du transport mondial (95 % du transport terrestre, et 100 % du transport maritime et aérien) dépend du pétrole.

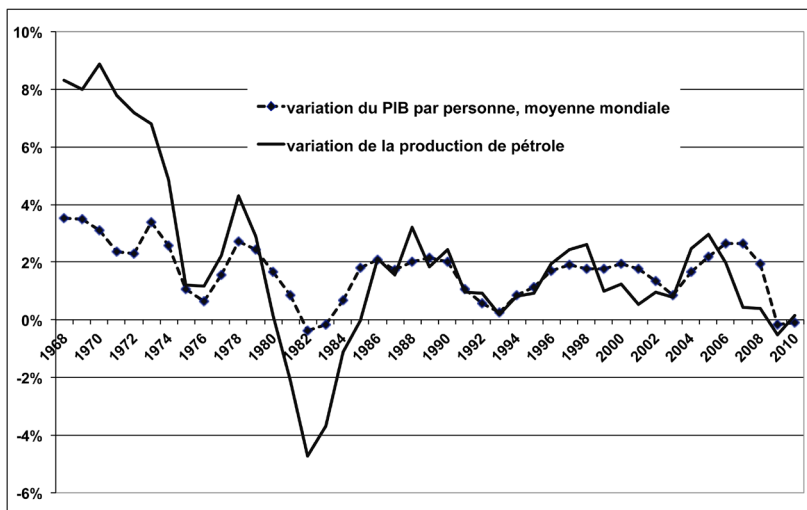
De ce fait, l'asservissement du système économique à la quantité de pétrole disponible (et non à son prix) est majeur, ce qui se constate aisément en observant les variations comparées de la production pétrolière mondiale et du PIB par tête mondial (*graphique 3*).

L'enchaînement économique qui prend

place est alors le suivant : quand la production de pétrole ne suit pas la demande souhaitée, le prix du pétrole augmente fortement. Comme, par ailleurs, le pétrole représente 40 % de l'énergie finale dans le monde, quand il n'y a « pas assez de pétrole », cela signifie qu'il n'y a « pas assez d'énergie » et surtout « pas assez de transport ».

Le lien évoqué ci-dessus entre énergie et PIB fait qu'il y a alors un « manque de PIB », ce qui implique un ralentissement économique ou une récession peu après la tension sur le prix du pétrole. Mais, dans cet enchaînement, la hausse du prix du pétrole et la récession ne sont pas directement la conséquence l'une de

Graphique 3



Variations respectives, depuis 1965, de la quantité de pétrole produite (donc consommée) dans le monde (pas du prix!), en trait plein, et du PIB par personne en moyenne mondiale, en pointillé. Dans les deux cas de figure, il s'agit de moyennes glissantes sur trois ans. Calculs de l'auteur sur BP Statistical Review 2012 pour le pétrole, et World Bank 2012 pour le PIB. On constate que la corrélation a augmenté depuis 1985 et n'a pas baissé. Notre économie n'est pas moins dépendante du pétrole, à cause de la mondialisation elle l'est encore plus.

l'autre, mais deux conséquences consécutives d'une même insuffisance d'énergie liquide. *La diffusion de la tension sur le pétrole dans l'économie relève avant tout d'un effet volume, non d'un effet prix.*

C'est la raison pour laquelle un choc pétrolier annonce toujours une récession, comme cela s'est vérifié chaque fois depuis 1974.

L'énergie disponible par personne va continuer à baisser en Europe.

L'énergie européenne est fossile à 80 %. Malgré le tropisme de la presse française pour le nucléaire et l'éolien, tous les pays d'Europe, France comprise, ont un approvisionnement énergétique (attention, pas uniquement électrique !) qui est dominé par les énergies fossiles (pétrole, charbon,

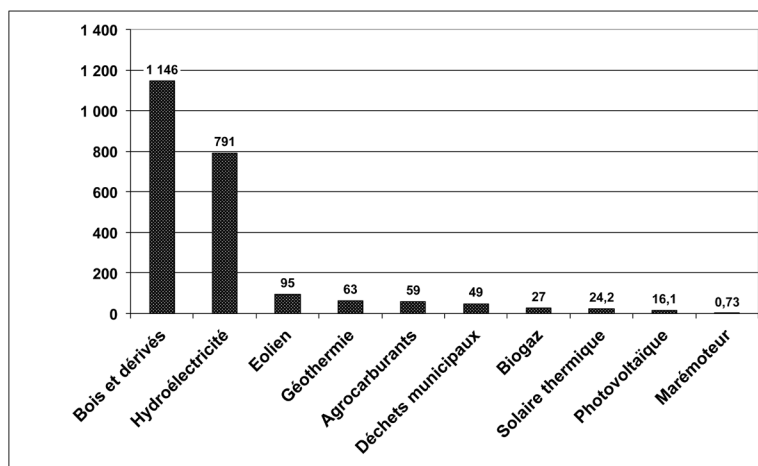
gaz). Plus précisément, les deux tiers de l'énergie européenne viennent du pétrole (40 %) et du gaz (25 %).

Malgré le discours médiatique, la France et l'Allemagne ont la même fraction d'énergies renouvelables dans leur mix primaire hors bois (environ 7 %). La presse – toujours ! – a tendance à focaliser l'attention du lecteur français sur l'éolien et le photovoltaïque, en oubliant les barrages, pourtant premiers contributeurs d'électricité renouvelable au monde – et également en Europe (*graphique 4*) !

L'éolien représente seulement 10 % de l'hydroélectricité, et le photovoltaïque 2 %.

L'approvisionnement pétrolier de l'Europe va décroître (celui de la France aussi). Le pétrole mettant de 50 à 400 millions d'années pour se

Graphique 4



Production d'énergie renouvelable dans le monde par type, en 2011, en millions de tonnes équivalent pétrole (la consommation mondiale vaut environ 13 000 avec cette unité). Le bois représente donc 8 % du total mondial, et l'hydroélectricité 6 % (en équivalent primaire). Les autres sources sont marginales. Sources diverses, 2012.

former, la quantité de pétrole existant dans le sous-sol a été fixée une fois pour toutes au début de la civilisation industrielle. Les mathématiques nous enseignent alors que, quand la totalité d'un stock extractible a une valeur maximale, l'extraction annuelle de ce stock ne peut rien faire d'autre que de partir de zéro, passer un jour par un maximum, et tendre ensuite vers zéro à nouveau.

Cette conclusion s'applique du reste à toute ressource non renouvelable, et pas seulement au pétrole : gaz, phosphates, potasse, minerais métalliques de toute nature, eau fossile, etc., auront droit au « pic ». Les seules questions sont toujours les mêmes : celle de la date du pic (qui peut être très proche dans le temps ou très éloigné) et celle du niveau (qui peut être proche du niveau actuel de production ou très au-dessus).

Or, les découvertes mondiales de pétrole sont passées par un maximum dans les années 1960 – il y a cinquante ans déjà ! – et celles de gaz ont culminé dans les années 1970². Les découvertes annuelles moyennes sont désormais cinq fois plus faibles que ce qu'elles étaient à l'âge d'or de l'exploration des hydrocarbures, il y a quarante ou cinquante ans.

Le décalage d'environ cinquante ans entre découvertes et production au niveau mondial suggère que le maximum de production du pétrole surviendra vers 2020, plus ou moins cinq ans, y compris en incluant dans le terme « pétrole » des liquides issus du gaz et des non-conventionnels (dont les gaz de schiste).

En parfaite cohérence avec l'évolution générale qui figure ci-dessus, la production mondiale de pétrole plafonne depuis 2005, alors qu'elle augmentait de plus de 5 % par an avant les chocs pétroliers de la décennie 1970, et encore de près de 1 % par an entre 1980 et 2005.

Une production stable dans un monde où le

nombre de consommateurs augmente a un effet évident : la diminution de la capacité de consommation par consommateur. Plus précisément, les pays émergents et les pays producteurs augmentant leur consommation, la quantité de pétrole disponible pour les importateurs historiques baisse. C'est le cas de la France, qui importe 99 % de son pétrole : nous avons perdu presque 10 % de notre pétrole depuis 2000, soit environ 10 millions de tonnes par an, mais le transport a été le secteur le moins touché (l'essentiel de la baisse concerne le chauffage et l'industrie).

C'est aussi le cas de l'Europe dans son ensemble (*graphique 5*).

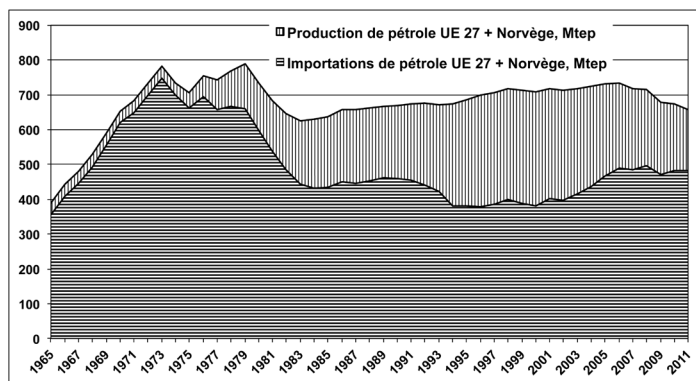
La production mondiale ne va plus beaucoup varier d'ici à 2020 (plus ou moins cinq ans), puis elle va se mettre à décliner à raison de 2 % par an environ (le déclin par personne sera alors de 3 % à 4 %, selon l'évolution démographique). Par ailleurs, le déclin de la production de la mer du Nord va continuer. Une conclusion s'impose : *l'Europe, dès à présent, va voir de moins en moins de pétrole, alors que ce dernier représente 40 % de son approvisionnement énergétique* (un tiers en France) et alimente la quasi-totalité de son transport, indispensable à une économie mondialisée.

L'approvisionnement gazier de l'Europe a cessé de monter et va bientôt décroître (celui de la France aussi). Pour le gaz, soit 26 % de l'approvisionnement européen, il y a aussi eu une inflexion en 2005 sur l'approvisionnement européen (*graphique 6*).

Le déclin de la production de la mer du

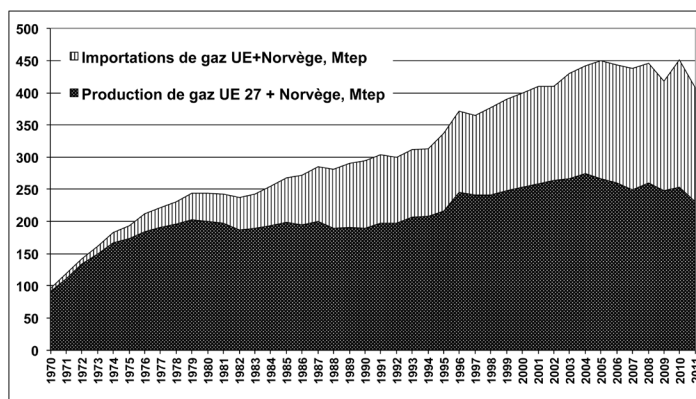
2. Les découvertes récentes au large du Brésil représentent, par comparaison, de l'ordre de vingt à trente milliards de barils récupérables, soit moins de 10 % de ce qui était découvert tous les cinq ans dans les « belles » années de l'exploration pétrolière.

Graphique 5



Pétrole disponible pour l'Europe, en millions de tonnes par an. La courbe hachurée du haut donne ce qui vient de la mer du Nord (et très marginalement de la mer Noire), et la partie du bas ce qui est importé. La production de la mer du Nord est en déclin rapide depuis 2000 (d'environ 5 % par an désormais), et depuis 2007 les importations diminuent aussi, à cause du plafonnement de la production mondiale survenu en 2005. *Source* : BP Statistical Review, 2012.

Graphique 6



Consommation de gaz en Europe, en millions de tonnes équivalent pétrole par an. La courbe basse donne ce qui vient de la mer du Nord, et la partie haute ce qui est importé. On constate que, depuis 2005, la consommation a arrêté de croître, et fluctue autour de 450 millions de tonnes équivalent pétrole par an. *Source* : BP Statistical Review, 2012.

Nord, lent pour l'heure, va s'accélérer d'ici à 2020, quand la Norvège va passer son pic. La mer du Nord va alors perdre 5 % à 10 % de son gaz par an, soit 12 à 25 millions de tonnes équivalent pétrole par an.

Pouvons-nous compenser par des importations ? Pas si facilement que cela : le gaz est une énergie qui se transporte mal sur de longues distances (parce qu'il est gazeux!), ce qui, en termes économiques, signifie que le gaz coûte de cinq à dix fois plus cher par kWh transporté que le pétrole. Ainsi, 65 % du pétrole mondial passe une frontière entre le pays de production et le pays de consommation, alors que ce n'est le cas que pour 30 % du gaz mondial. Le GNL (gaz liquéfié) ne représente que 10 % de la consommation mondiale de gaz, car il demande des infrastructures très capitalistiques.

Les importations de gaz russe, aujourd'hui, représentent un peu plus de 20 % de la consommation européenne, soit 100 millions de tonnes équivalent pétrole par an (et, symétriquement, l'Europe consomme 15 % du gaz russe). Pour compenser le déclin européen, il faudrait que ces exportations augmentent de 12 % à 25 % par an (tous les ans). Cela reviendrait à ce que le gaz russe exporté vers l'Europe double en six ans, et triple en dix à quinze ans, représentant alors près de la moitié du gaz russe. Aucun spécialiste du gaz ne considère cela comme plausible. Les autres pays significatifs de l'ancien bloc soviétique, Turkménistan et Ouzbékistan, représentent à eux deux la production actuelle de la Norvège, et leur production, agrégée à celle de la Russie, ne devrait pas beaucoup augmenter.

Pouvons-nous, alors, compenser avec des « gaz de schiste » ? Là encore la réalité européenne n'est probablement pas à la hauteur des espoirs placés en elle. Aux États-Unis, la production de gaz de schiste *stricto sensu* – terme

impropre pour désigner des gaz de roche-mère – s'élève à environ 100 millions de tonnes équivalent pétrole par an (sur une production totale de 600 millions de tonnes). Dans le même temps, la production de gaz issu de veines de charbon (il s'agit tout simplement du grisou contenu dans ce charbon, remonté en surface après fracturation de la veine) représente environ 50 millions de tonnes équivalent pétrole par an, et les gaz de réservoirs compacts (des roches-réservoirs presque identiques aux gisements habituels de gaz, à ceci près que les pores ont cessé de communiquer entre eux et qu'il faut recréer de la perméabilité en fracturant depuis la surface) à peu près 200 millions de tonnes équivalent pétrole par an. Les 300 millions de tonnes équivalent pétrole par an qui restent sont du gaz issu de gisements « ordinaires ».

En Europe, nous n'avons pas de réservoirs compacts ou de veines de charbon profondes fracturables de manière significative, et, pour les roches-mères, nous en avons effectivement en France et en Pologne mais, sans forages, il est impossible de savoir si elles contiennent effectivement du gaz exploitable et en quelles quantités. En Pologne, après quelques forages préliminaires non concluants, Exxon a décidé de ne pas poursuivre l'exploration de gaz de schiste dans cette zone (juin 2012).

Rappelons qu'une réserve est un volume dont l'extraction est certaine, non une évaluation hypothétique effectuée avec de simples observations de surface.

En Pologne toujours, l'Institut géologique du pays vient de réviser fortement à la baisse une évaluation initiale de l'Energy Information Agency (États-Unis), en la divisant par... 10 ! La valeur la plus optimiste publiée par l'Institut est désormais de quelques centaines de millions de tonnes équivalent pétrole de gaz extractible,

pouvant conduire à une production annuelle de quelques pourcents du total extractible, soit 5 % de la production européenne actuelle en ordre de grandeur.

Car, à supposer qu'il y ait des réserves, la production sera moins aisée que pour le gaz « ordinaire ». Les roches-mères sont imperméables et, pour créer de la perméabilité, il faut fracturer la roche, en installant pour cela un puits tous les deux kilomètres. Ces puits occupent quelques hectares (avec installations annexes), qui doivent être déforestés. Il faut aussi disposer en surface d'un réseau de gazoducs pour évacuer le gaz produit. Il faut disposer dans le pays d'une kyrielle de sociétés de forage et de services pétroliers pour forer et exploiter des milliers de puits. Il faut enfin que le droit minier autorise une mise en chantier très rapide, pour permettre à toutes ces opérations de prendre place dans un court laps de temps.

Toutes ces conditions sont réunies aux États-Unis, qui est historiquement un pays de petits producteurs disséminés sur le territoire en raison de la particularité du droit minier, mais ce n'est pas le cas en Europe. De ce fait, même si nous estimons compatible avec la limitation des émissions de gaz à effet de serre d'exploiter d'éventuels gaz non conventionnels en Europe, la montée en puissance sera (très) lente : ces gaz permettraient plus de limiter la vitesse du déclin que d'empêcher ce dernier, avec une production annuelle qui aura du mal à dépasser – pour l'ensemble de l'Europe – quelques dizaines de millions de tonnes équivalent pétrole par an au bout d'une ou deux décennies, alors que le déclin de la mer du Nord sera de cet ordre... tous les deux à quatre ans.

Le plus probable est donc que le pic de production de la Norvège va marquer le début d'un déclin progressif de l'approvisionnement

de gaz en Europe (au niveau mondial il devrait y avoir le début d'un très long plateau vers 2020). Si, en plus, l'Allemagne utilise une partie de ce gaz résiduel pour remplacer son nucléaire, comme elle en a l'intention pour le moment³, cela ne fera que contracter encore plus vite les autres consommations de gaz (dont celles des centrales électriques existantes).

L'approvisionnement énergétique total de l'Europe est déjà en baisse. À cause de ce qui précède, la disponibilité en pétrole et en gaz a déjà commencé à baisser en Europe, de 10 % entre 2005 et 2011. De ce fait, l'approvisionnement énergétique européen global a baissé de 7 % de 2006 à 2011.

Comme cette contraction est subie et non gérée, à cause du lien exposé au début de cet article, le PIB européen a baissé de 2 % de 2008 à 2010 (il y a toujours un décalage), nonobstant tous les discours sur les renouvelables qui doivent compenser, et nonobstant toutes les promesses de croissance qui reviennent à la mode ! Et il est parfaitement logique que 2012 s'annonce comme une année de récession...

Le lien énergie-économie signifie une croissance nulle pour les cinq ans à venir en France et en Europe.

En prolongation tendancielle, l'évolution évoquée ci-dessus pour l'énergie va donc continuer : l'approvisionnement pétrole + gaz va baisser, et comme il représente les deux tiers de l'approvisionnement énergétique global, ce der-

3. En juin 2011, Angela Merkel a déclaré : « Si nous voulons nous passer du nucléaire, pour la phase de transition nous avons besoin de centrales électriques au gaz et au charbon [...]. Au moins 10, et plus vraisemblablement 20 gigawatts de telles centrales doivent être construites dans les dix prochaines années. » 20 gigawatts ≈ un tiers de la puissance nucléaire en France ≈ la puissance nucléaire abandonnée par l'Allemagne (23 GW). Belle « écologie » !

nier va baisser aussi (le taux de croissance pour les renouvelables est hors de portée pour compenser 1 pour 1).

À supposer que l'on puisse conserver le progrès technique spontané en pareil cas (ce qui n'est pas certain : ce progrès demande des investissements qui ralentissent justement en période de récession), cette baisse va se traduire par, au mieux, une stagnation du PIB mais, plus probablement, une évolution négative du PIB européen (et français) dans les cinq ans qui viennent.

En France, une croissance nulle plutôt que celle qui sous-tend le programme de François Hollande (qui a établi ses engagements sur une croissance cumulée de l'ordre de 10 % sur la période 2012-2017⁴), c'est 100 milliards de moins de recettes fiscales et sociales, alors que dans ce genre de contexte les dépenses augmentent (chômage, aide sociale, etc.).

Plus précisément, en France nous utilisons actuellement 1 kWh d'énergie finale pour obtenir un euro de PIB⁵. Si une tonne de pétrole devient indisponible, alors que la France « voudrait » la consommer, cela signifie que nous sommes privés d'environ 11 600 kWh de contenu énergétique (celui d'une tonne de pétrole), et donc, toutes choses égales par ailleurs, nous ne pourrions plus produire environ 10 000 euros de PIB. En fait, l'asservissement au pétrole est plus fort encore, et il faut multiplier ce chiffre par deux ou trois.

En pratique, cela signifie que si nous avons une baisse de 2 % par an du pétrole disponible en France, soit 1,5 million de tonnes de pétrole en moins chaque année, sans mesures d'adaptation draconiennes cela engendre 30 à 40 milliards d'euros de PIB en moins chaque année. C'est une illustration de ce que signifie une « décarbonisation involontaire », laquelle a commencé à se produire depuis 2005, faute d'avoir choisi une

voie volontaire avant. Et plus nous attendons pour décarboner massivement l'économie de manière volontaire, plus la récession en sortie sera sévère.

Les points évoqués ci-dessus amènent aux considérations suivantes :

– *Aucune transition énergétique ne peut exclure une baisse rapide des combustibles fossiles.* Soit nous provoquons délibérément cette baisse, en limitant la récession associée, soit nous la subissons de manière non préparée, avec des chocs et des récessions plus amples.

– *Cette transition énergétique va démarrer dans un monde sans croissance, voire en légère récession permanente.* Avoir besoin de la croissance pour que cette transition prenne place de manière gérée est l'assurance qu'il se passera autre chose – de bien plus désagréable – que ce qui est planifié.

– En période de récession, les investissements ont spontanément tendance à baisser, ce qui s'est constaté chaque fois depuis 1974. Comme les capitaux seront de plus en plus difficiles à trouver, il faut maximiser l'efficacité « fossile » par euro investi : *il faut donc privilégier les mesures qui demandent le moins de capital initial par kWh de pétrole ou de gaz évité* (ce qui revient à minimiser le coût à la tonne de CO₂ évité). Une analyse préalable conduite sur ces bases devrait précéder n'importe quel projet d'infra-

4. Voir François Hollande, « Mes engagements pour la France », janvier 2012, p. 40 ; <http://www.parti-socialiste.fr/articles/les-60-engagements-pour-la-france-le-projet-de-francois-hollande>.

5. L'énergie finale est celle qui sort du système énergétique, l'énergie primaire celle qui entre dans le système énergétique (et doit donc se trouver « quelque part » dans la nature). La différence entre les deux correspond aux pertes du système (extraction, transport, raffinage, distribution, conversion d'une énergie en une autre). En 2010, en France, le PIB a été de 1 900 milliards d'euros et la consommation d'énergie finale d'un peu plus de 1 800 milliards de kWh (toutes énergies confondues).

structure, n'importe quelle mesure d'aménagement du territoire, n'importe quelle politique industrielle, n'importe quelle mesure fiscale ou de subvention impactant la consommation d'énergie, et n'importe quel plan concernant l'enseignement supérieur ou la recherche (inutile de chercher des solutions qui ont besoin d'énergie pour être mises en œuvre, ou de former à des métiers qui ont aussi besoin de ce genre de contexte !).

– Dans ce contexte, *tout argent mis dans les énergies renouvelables pour remplacer de l'énergie nucléaire est sans effet pour diminuer la dépendance aux combustibles fossiles, et donc sans effet pour éviter les récessions futures liées aux chocs pétroliers futurs*. Dit autrement, en période de capitaux rares, donner la priorité à des investissements dans les renouvelables électriques en France pour remplacer du nucléaire engendre, par effet d'éviction, un assèchement sur les investissements nécessaires « ailleurs » pour se débarrasser du pétrole et du gaz et *renforce donc les troubles économiques à venir*. Incidemment ces investissements visant à remplacer le nucléaire par des renouvelables sont également sans effet pour diminuer les émissions de CO₂, et donc sans effet pour éviter de contribuer à la déstabilisation accélérée du système climatique. En Allemagne, la politique choisie est même de négliger la lutte contre le changement climatique au profit de la lutte contre le nucléaire (puisque l'essentiel du nucléaire va être remplacé par des centrales à gaz et à charbon, de l'aveu même des dirigeants allemands), ce qui ne se justifie ni sur le plan environnemental ou sanitaire (le charbon est considérablement plus nocif, à tout point de vue, que le nucléaire), ni sur le plan de l'utilisation des capitaux disponibles.

– Dans cette « transition », *la première priorité est de « sortir » gaz et fioul du chauffage des bâti-*

*ments*⁶ pour les remplacer par de l'isolation, des pompes à chaleur alimentées à l'électricité nucléaire, et de la biomasse (en direct ou *via* des réseaux de chaleur). On peut aussi tester la cogénération nucléaire (le refroidissement des réacteurs sert à fournir de l'eau chaude ou tiède aux villes les plus proches, pour alimenter pompes à chaleur ou réseaux de chaleur). L'arbitrage entre chaque élément de cette mesure (isolation et mode de chauffage différent) dépend du type de bâtiment et de ses performances initiales, ainsi que du prix futur de l'énergie.

– Avec 33 millions de logements en France, et 90 m² par logement, nous avons environ 3 milliards de mètres carrés construits pour nous loger, auxquels il faut ajouter 50 % de bâtiments autres. Reconstruire ou rénover 80 % de ce parc (le reste devra probablement être abandonné) suppose donc de mobiliser de 1 500 à 3 000 milliards d'euros, selon la nature du programme. L'ensemble ne serait pas investi dans la seule rénovation, mais aussi dans l'augmentation des capacités électriques.

– Pour fixer les idées, un chauffage « tout pompe à chaleur » en France avec un parc rénové (consommation moyenne diminuée de moitié, pas d'accroissement des mètres carrés) demanderait environ 100 TWh électriques supplémentaires (la consommation finale passerait de 700 à 300 TWh). 100 TWh en nucléaire, cela fait de 12 à 15 GW installés si cette électricité est produite en base (de manière identique toute l'année). Si cette électricité doit être produite sur une plage de temps plus courte qu'une année, parce que l'essentiel est du chauffage

6. Le chauffage au gaz et au fioul représente environ 20 % de la consommation d'énergie finale du pays, 15 milliards d'euros d'importations annuelles de pétrole et de gaz, et environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre du pays.

l'hiver (mais cela dépend de l'utilisation du parc par ailleurs), il faut augmenter la puissance installée en conséquence. Avec de l'éolien stocké (facteur de charge de quatre à six fois plus faible que celui du nucléaire), il faut de 50 à 100 GW installés, et en photovoltaïque de 100 à 200 GW installés (voir l'annexe en fin d'article pour comprendre cette équivalence). Bien entendu, si une partie du chauffage est fait à la biomasse – *via* des poêles ou des réseaux de chaleur – il faut moins d'électricité.

– *La deuxième priorité est de décarboner l'industrie lourde* (productrice de matériaux de base : ciment, acier, chimie, métallurgie des non-ferreux, papier-carton), en lui imposant des contraintes d'efficacité tout en lui fournissant de l'électricité décarbonée pas chère. Si nous ne le faisons pas, comme cette industrie est actuellement dépendante des combustibles fossiles et électro-intensive, elle partira ailleurs. Sans industrie lourde sur place, et en période de contraction du pétrole (donc des transports), nous aurons ensuite du mal à conserver une industrie manufacturière « locale ». Cette décarbonisation passe par l'électrification des processus (remplacement des fours à gaz par des fours électriques par exemple) tout en fournissant cette électricité par du nucléaire ou du charbon avec séquestration (pour la Pologne et l'Allemagne). Cela passe aussi par l'augmentation du recyclage et la « circularisation » de l'économie⁷, la séquestration du CO₂ pour les processus utilisant du charbon (ou la production d'acier « bas carbone »), et l'augmentation de l'efficacité énergétique des processus industriels en règle générale.

– Pour électrifier ces processus industriels, qui consomment actuellement 300 TWh d'énergie fossile par an (du gaz pour moitié), il faudrait, après économies d'énergie portant sur le tiers (à

peu près, je n'ai pas fait de calculs précis!), environ 200 à 250 TWh électriques supplémentaires, soit 30 GW électriques supplémentaires, ou 100 à 150 milliards d'euros d'investissements (l'ordre de grandeur est le même si une partie reste au charbon ou gaz avec capture et séquestration).

– Une partie des investissements peut ici être effectuée par le secteur industriel lui-même, à condition de lui fournir un cadre fiscal – taxe carbone ou quotas payants avec un prix de réserve en cas d'enchères – et réglementaire stable, et de le protéger contre la concurrence internationale non réglementée en traitant la taxation aux frontières comme une TVA.

– *La troisième priorité est de diminuer très rapidement la consommation (et donc la taille et la puissance) des véhicules à pétrole*, pour conserver une mobilité en période de baisse de l'approvisionnement pétrolier, et de favoriser l'émergence à plus long terme du véhicule électrique, ce qui passera ici aussi par l'augmentation du nucléaire car, pour accroître la fourniture d'électricité en période de baisse de l'approvisionnement en gaz (et surtout pour fournir de grandes quantités d'électricité pilotable et sans carbone pour pas trop cher), c'est la principale marge de manœuvre. Le remplacement du parc actuel de véhicules, en France, par des véhicules qui consomment quatre fois moins nécessite de 300 à 600 milliards d'euros de capital. À plus long terme il est indispensable de revoir la totalité de l'urbanisme étalé (pour en supprimer une partie) créé à l'époque de l'énergie abondante et pas chère.

7. Ce qui inclut, par exemple, l'utilisation systématique du laitier de haut fourneau pour faire des liants à la place du ciment; on peut économiser plusieurs pourcents de la consommation d'énergie et des émissions avec cette seule mesure.

– Pour électrifier «un jour» tout le parc routier, qui consomme aujourd’hui 550 TWh de produits pétroliers, à puissance et kilométrages constants, il faudrait environ 200 TWh électriques supplémentaires (l’efficacité du moteur électrique est très supérieure), si nous arrivons à résoudre les problèmes de stockage. En diminuant la puissance des véhicules on peut bien évidemment se contenter de moins.

– Même si nous n’avons plus de croissance, décarboner l’économie française suppose donc de disposer d’environ 500 TWh électriques «sans carbone» en plus dans l’approvisionnement annuel, et cela après avoir diminué, par des efforts d’économie d’énergie, cet approvisionnement de 700 à 800 TWh finaux (économies + nucléaire permettent donc de substituer 1 300 TWh fossiles). Côté offre, avec du nucléaire cela représente environ 300 milliards d’euros (ou un doublement du parc), sans compter le réseau et le stockage. Avec de l’éolien stocké, cela représente environ 2 000 milliards ; avec du photovoltaïque stocké, 10 000 milliards d’euros (dans les deux derniers cas de figure, la gestion de l’intermittence coûte bien plus cher que la production brute). Nombre d’énergies renouvelables autres (biogaz, méthanation, etc.) sont dans les mêmes ordres ou encore plus chères. Rappelons que ces investissements devront être maintenus alors que nous traverserons périodiquement des crises et des récessions.

– Dans tous les cas de figure cette «transition» suppose de mobiliser des milliers de milliards d’euros en quelques décennies, soit de 50 à 150 milliards d’euros par an. Si nous prenons un rendement du capital investi de 2 % à 4 % par an, ce qui est acceptable pour

un opérateur public mais pas pour un acteur privé – *a fortiori* coté en Bourse –, on peut justifier d’investir de 1 500 à 3 000 milliards d’euros pour économiser 60 milliards d’euros d’importations de pétrole et de gaz par an. Avec un souhait de rendement du capital investi de 10 % par an, on ne peut investir que 600 milliards. Les investissements privés spontanés ne suffiront donc pas pour financer la transition énergétique à la bonne vitesse (supprimer l’essentiel des combustibles fossiles en quarante ans).

– Il faut donc passer par des acteurs publics. Mais le budget public étant déjà exsangue, il n’y a que deux moyens envisageables pour amener les capitaux nécessaires : la création monétaire dédiée, *via* le financement par la Banque centrale européenne de banques publiques (ou privées avec une séparation très stricte des activités concernées) ou la mobilisation de l’épargne (qui, en France, est de 4 000 milliards d’euros en liquide ou semi-liquide et 8 000 milliards d’euros en immobilier).

– *À défaut de financer la «bonne» transition, nous aurons un effondrement économique, et absolument pas la matérialisation des promesses de campagne (la physique reste plus forte que les discours des candidats).* La promesse du retour de la croissance «normale», actuellement mise en avant par François Hollande, est irresponsable, et conduira une fois de plus à la montée de Marine Le Pen quand la population verra que cette croissance ne se matérialise pas. Dans tous les cas de figure, il faut aussi apprendre à réenchanter un avenir sans croissance économique.

Jean-Marc Jancovici.

ANNEXE

Quelques ordres de grandeur pour les énergies électriques

L'électricité peut s'obtenir avec des moyens de production divers. Ces derniers ne sont égaux ni en durée de vie (de vingt ans pour l'éolien à soixante ans pour le nucléaire), ni en nombre d'heures de fonctionnement dans l'année (de 1 000 heures par an pour le photovoltaïque à 8 000 heures par an pour l'hydraulique au fil de l'eau ou toute centrale thermique – nucléaire, charbon, gaz – fonctionnant en base), ni en coût du kW installé (de 500 euros le kW de puissance pour le gaz à 4 000 pour le nucléaire... ou le photovoltaïque).

Le mode de production électrique qui demande le moins de capital initial est le gaz, avec 0,2 centime d'investissement initial par kWh produit sur la durée de vie. Dit autrement, dans le coût de production d'un kWh avec une centrale à gaz, qui s'élève à environ 5 centimes, seuls 0,2 centime vient de l'investissement initial. C'est la raison pour laquelle ce type de centrale est privilégié dans un système électrique « libéralisé », bien qu'il émette du CO₂ et dépende du gaz dont la disponibilité future va baisser en Europe dans peu de temps.

Juste après vient le charbon (0,5 centime d'investissement initial par kWh produit sur la durée de vie), puis le nucléaire (0,8 centime d'investissement

initial par kWh produit sur la durée de vie). Le nucléaire émet 100 fois moins de CO₂ par kWh que le charbon, lequel est importé pour moitié en Europe, mais demande plus de capital de départ, raison principale pour laquelle il n'émerge pas spontanément dans des entreprises privées.

Pour les renouvelables, le coût en capital est bien plus élevé encore : l'éolien à terre demande 2,8 centimes d'investissement initial par kWh produit sur la durée de vie, l'éolien en mer 5 centimes. Le photovoltaïque demande 16 centimes d'investissement initial par kWh produit sur la durée de vie, soit vingt fois plus que le nucléaire avant coûts de stockage. Pour le moment, le coût de l'intermittence de l'éolien et du photovoltaïque est à la charge des autres producteurs, mais si le réseau devait prendre en charge ce stockage avec une pénétration massive de ces énergies, il faudrait probablement doubler ou tripler l'investissement initial. Tous les opposants au nucléaire qui lui reprochent son coût en capital devraient donc être encore plus opposés à l'éolien et au photovoltaïque ! Car si nous n'avons pas l'argent pour renouveler le nucléaire, on se demande bien où nous trouverons de cinq à dix fois cet argent pour faire des éoliennes à la place, avec des récessions à répétition...