

## La transition énergétique : une mise en perspective historique Séminaire avec Mathieu Arnoux

notes prises par *Hervé Dumez*  
*i3-CRG École polytechnique CNRS Paris-Saclay*

LE 12 MAI 2015, LE  
SÉMINAIRE DU  
GRETS RECEVAIT  
MATHIEU ARNOUX,  
HISTORIEN DU  
MOYEN-ÂGE,  
COFONDATEUR  
DU LABORATOIRE  
INTERDISCIPLINAIRE  
DES ÉNERGIES DE  
DEMAIN ET AUTEUR  
DE : LE TEMPS DES  
LABOUREURS.  
TRAVAIL,  
CROISSANCE ET  
ORDRE SOCIAL EN  
EUROPE (XI<sup>E</sup>-XIV<sup>E</sup>  
SIÈCLES), 2012.

La première question à se poser consiste à se demander ce qu'est l'énergie pour un historien. On peut faire la proposition que l'énergie est une des dimensions essentielles du rapport que l'homme (en société) entretient avec son environnement. C'est le moyen qu'il emploie pour utiliser et/ou transformer celui-ci à son profit. Toutes les étapes du développement technique et économique des sociétés peuvent être caractérisées en termes énergétiques. L'énergie peut être définie comme une quantité mais une approche qualitative est indispensable. Fondamentalement, on peut couvrir à peu près la totalité de l'histoire humaine, disons 50 000 ans, à partir d'une analyse des techniques, puisque l'étude de la préhistoire est essentiellement une étude des techniques. Il ne s'agit évidemment pas de tout renvoyer à l'énergie, mais le facteur énergétique est chaque fois central ou essentiel. Or, ce que l'on constate dans la littérature courante est que les études sur l'énergie finissent le plus souvent par une exponentielle, censée illustrer le destin de notre monde. Personnellement, je suis en désaccord profond avec cette manière de décrire une évolution. Pour un médiéviste, l'exponentielle n'est qu'une figure de la métaphore du jugement dernier... Il faut rompre avec ce discours implicitement religieux que nous transmettons.

Partons d'une citation extraite d'une des premières œuvres de la littérature anglaise, *Piers Plowman* (ou en français : *Pierre le Laboureur*) :

For hit is symonye to sull that sent is of Grace,  
And that is wit, and water and wynde and fuyre the ferthe ;  
Thise foure sholde be fre to alle folk that hit nedeth.  
« Car c'est simonie que de vendre ce qui nous vient de la Grâce  
C'est-à-dire sagesse, eau, vent et feu, le quatrième ;  
Toutes quatre devraient être gratuites pour tous ceux qui en ont nécessité. »  
John Langland, *Piers Plowman*, C-Text, Passus 9, v. 54-56 (vers 1380)

L'eau, le vent et le feu sont trois des quatre éléments. Le quatrième est normalement la terre : mais il n'est pas possible au XIV<sup>e</sup> siècle de dire qu'on ne peut pas vendre la terre ! Du coup, il a été remplacé ici par la sagesse.

En lisant ce texte, on pense à l'énergie : eau, vent, feu. Mais il s'agit en fait d'une réflexion sur les choses qui n'appartiennent à personne (*res nullius*) parce qu'elles appartiennent à tout le monde et qui, donc, ne doivent pas être appropriées et vendues. On est donc dans la philosophie du droit. En même temps, ce n'est pas un hasard si l'on est aussi dans une problématique qui a trait à l'énergie. Ce n'est



Moulin à eau dans la montagne, Albrecht Dürer (1494-1495)

1. Le *mix* énergétique permet de mesurer les unes par rapport aux autres les ressources mises à contribution pour répondre aux besoins en énergie d'une économie.

pas de la protohistoire de l'énergie mais, par contre, les problèmes énergétiques du Moyen-Âge ont un statut qui se prête à des formulations de ce genre. L'eau, depuis les Romains, est publique. Il y a bien eu des tentatives de la part des seigneurs au Moyen-Âge pour taxer le vent utilisé par les moulins mais elles se sont heurtées à un problème religieux : le vent est assimilé au Saint-Esprit et il souffle où il veut (*Évangile de Jean*, 3, 8).

La question est donc : parler d'énergie pour cette époque, est-ce un simple jeu de mots, ou attrape-t-on quelque chose d'important ?

Pour situer le propos, je précise quelques références cadrant le débat. Il y a d'abord, qui restent des références incontournables sur l'histoire des techniques, Leroi-Gourhan (1943) et Gille (1978). Hunter (1979) est intéressant en ce qu'il montre que la révolution industrielle américaine est avant tout une révolution de l'hydraulique, c'est-à-dire une révolution de l'énergie renouvelable. Pomeranz (2010) estime que la divergence entre la Chine et l'Europe est due au fait qu'il y avait du charbon en Europe et pas en Chine. Mais Allen (2009) a contesté cette analyse. Kander *et al.* (2014) sont les auteurs d'une courbe exponentielle. Ils ont formulé une courbe de la consommation d'énergie *per capita* qu'ils présentent comme stable durant des siècles puis explosant à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle. Mais ces auteurs expliquent dans leur livre qu'ils n'ont en fait aucun chiffre avant le XVIII<sup>e</sup> ! Or, entre 1500 et 1800, la population est multipliée par 7 ou 8 alors que les effets de la révolution industrielle ne se font sentir que vers 1840. Cela veut dire qu'un système à base de moulins à eau, de moulins à vent, de bois et d'animaux a été capable de multiplier sa capacité de production dans des proportions étonnantes. Cela a bien évidemment des répercussions sur ce que nous vivons aujourd'hui.

Pour aborder la question du *mix* énergétique<sup>1</sup> et de la transition, suivons un personnage très important, le fer. La question posée est : existe-t-il une différence entre le fer européen et le fer chinois ? Le fer se trouve partout sur terre. Avant -1000, on n'en trouve pas trace d'exploitation. Entre -800 et -400, il se développe partout dans le monde. Une recherche ethnologique est menée entre 1938 et 1940 dans le Fouta-Djallon, en Guinée (Appia, 1965). Les fourneaux font environ 1,80 m de hauteur. C'est comme cela que l'on peut se représenter la production du fer en Europe jusqu'au milieu du XIII<sup>e</sup> siècle. Et ce que l'on connaît en Europe, c'est un travailleur et un four. Un bloc est fourni, qui est dégrossi pour en sortir un lingot. L'excellence des produits dépend de la capacité du forgeron à faire alterner chauffage et martelage. On trouve des aciers de très haute qualité, dès le milieu du premier millénaire. Il ne sera pas possible d'en améliorer la qualité avant l'invention des aciers spéciaux et l'on sait très tôt différencier la qualité en fonction de l'usage demandé (soit le clou, qui se tord quand on l'enfonce, sans se casser ; soit des aciers susceptibles d'être affilés). On a là un système technique ayant des performances tout à fait remarquables.

À partir du XII<sup>e</sup> siècle en Europe, la population augmente (quadruplement en deux siècles) et la pression s'accroît sur ce produit de base. Le four lui-même n'est pas le problème : le premier verrou est le martelage. À la fin du XII<sup>e</sup> siècle, le problème est résolu par l'invention du marteau hydraulique. Du coup, le poids du marteau peut augmenter. C'est alors maintenant le four qui devient le problème. Si l'on augmente sa taille, il faut augmenter la ventilation. On invente alors d'abord le soufflet en

cuir, puis le soufflet en bois. Ces soufflets sont actionnés par une roue hydraulique installée sur un bief (jamais sur le cours principal de la rivière, pour permettre de réguler et de varier le débit sous contrôle). Là, on est dans la vraie innovation. Le creuset du fourneau est réellement agrandi. En variant la vitesse de la roue, on varie la ventilation. Si on augmente la température, on peut liquéfier le métal, donc on obtient la fonte. Jusque-là, celle-ci était considérée comme du fer raté. En martelant, on enlève le carbone et on va vers le fer. Il y a un aspect évident d'efficacité. Mais également un effet de sobriété. Le rendement énergétique est en effet grandement amélioré. Par contre, la conséquence va être la concentration de la production dans certaines régions. Notamment, les pays méditerranéens ne se prêtent pas à de telles installations. Un haut fourneau, dès le XVI<sup>e</sup> siècle, c'est en effet 500 hectares de forêt par an. 20 000 hectares de forêt doivent être affectés uniquement à cela. Peu de régions d'Europe peuvent se permettre une telle consommation de bois. Et cela doit se faire sans déstabiliser le système social, en particulier en ville ou dans les campagnes les plus densément peuplées : Paris a un besoin considérable de bois pour le chauffage et la construction. S'il y a pénurie dans la capitale, le prix du bois monte et les forges font instantanément faillite. Au fil du temps, on voit d'ailleurs les forges s'éloigner de Paris. Il faut réaliser que les crises de ressources dans ces périodes sont extrêmement graves. Elles sont à la mesure de celles que nous devons affronter aujourd'hui. En 1495, un rapport du Sénat de Gênes montre que la ville a le fer, les cours d'eau et le bois. Par contre, ce bois est celui des châtaigniers, leurs fruits étant l'aliment principal des pauvres des campagnes. Si on brûle les châtaigniers, il faudra nourrir les pauvres qui afflueront vers la ville. Le rapport se demande alors : ne vaut-il pas mieux externaliser la production de fer et acheter des armes ? On voit par-là que les gens de cette époque sont capables de tenir des raisonnements sophistiqués sur le développement industriel.

Venons-en à la comparaison avec la Chine (Arnoux, 2014). Les Chinois font de la fonte depuis l'époque des Han, 1 800 ans avant les Européens. Ils ne font que de la fonte et sont capables de faire des objets incroyables, des statues de deux/trois tonnes, magnifiques. Les sidérurgistes européens sont absolument incapables de faire de tels objets. Même au moment de la révolution industrielle. Clairement, il s'agit d'une autre voie, qui n'a jamais croisé la voie européenne, le parallélisme est absolu. Les Chinois font de tout avec la fonte, y compris des socs de charrue. Tout est cohérent avec une agriculture irriguée, dans des endroits sans cailloux et des charrues tirées par des bœufs car la fonte n'est pas capable d'encaisser l'accélération produite par des chevaux et elle ne supporterait pas un sol caillouteux. Les Chinois n'ignorent pas les qualités de l'acier : ils achètent ce dernier aux Indiens, aux Coréens et aux Japonais. Il s'agit d'une politique parfaitement délibérée : l'Empire se méfie des forgerons, dangereux par leurs compétences et leur indépendance. L'acier est exclusivement militaire, de la même manière que les chevaux acquis en Asie centrale sont exclusivement militaires. Les textes expliquent qu'il ne faut pas mettre l'acier aux mains des paysans, parce qu'ils vont s'en servir comme armes (et les Chinois ont d'ailleurs raison : c'est bien ce qui se passe en Europe).

Les deux cultures chinoise et européenne sont donc très différentes. En Chine, il n'y a pas de forgerons dans les villages : tout le monde, à l'échelle locale, est paysan et il n'y a pas de division du travail. En Europe, il y a des marchés extrêmement localisés et un forgeron dans chaque village. Il s'agit d'un spécialiste qu'il faut nourrir – et bien nourrir (la capacité physique requise est impressionnante). On a donc deux types

différents de communautés. En Europe, dans les fouilles de maisons du XIV<sup>e</sup> siècle, on trouve tout un ensemble d'outils abandonnés, cette gabegie illustrant une forme de luxe. Il ne faut pas oublier que l'architecture gothique est inconcevable sans le fer. Les vitraux de la Sainte Chapelle font treize mètres de haut. Il s'agit d'éléments en verre montés sur du plomb dans un cadre de fer. S'ils sont montés avec une inclinaison même infime, ils s'effondreront sous leur poids. Avec les techniques actuelles, ce serait encore une prouesse que de les refaire. En utilisant les techniques de l'époque, aucun artisan ou ingénieur contemporain ne se risquerait à essayer. Le degré de précision à atteindre est exceptionnel.

Mais le fer est aussi, et d'abord, agraire. Avant la révolution industrielle, pour un hectare de terre cultivé, c'est un à six kilos de fer consommé(s), par rupture ou abrasion. Il faut donc prendre conscience de ce que cela suppose en termes de production à l'échelle de l'Europe. Par ailleurs, tout gain en énergie est dépendant du fer. On ne peut pas utiliser un cheval sans le ferrer : sa capacité de trait dépend directement de la manière dont il est ferré. Le fer à cheval fait donc l'objet d'innovations constantes. Un moulin fait tourner des instruments en bois. Si le moulin va trop vite, il prend feu. Entre les XV<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, on a partout dans les mécanismes des moulins des colliers en fer ou des systèmes de liaison qui évitent le frottement bois contre bois extrêmement dangereux. Et pour transmettre le mouvement du bois à la meule, il faut un fer techniquement complexe à réaliser pour lier une structure rigide, la meule en pierre, à un matériau plus souple, le bois. C'est le fer qui à chaque fois permet de gagner en rendement. On pourrait continuer avec les charrettes et les charrues. La charrue est un instrument asymétrique sur lequel toute une série d'efforts se produisent. La capacité de l'araire et de la charrue à retourner la terre des champs est déterminée par la quantité et la qualité du métal qui compose le soc et le coutre. Seul un acier de qualité peut ainsi résister à l'abrasion et aux chocs qu'implique le labour d'une pièce de limon mal épierré. À l'extrémité de la charrue, le laboureur doit être lourd pour peser sur la charrue et, se cramponnant au manchon, le maintenir droit dans le sillon. Comme c'est souvent le cas dans les activités primaires, la capacité physique du laboureur importe : aux yeux des privilégiés, aux silhouettes déliées, les laboureurs sont des brutes. En fait, il s'agit d'une élite de costauds très bien nourris !

Essentiel dans un système céréalier, le moulin est un objet compliqué (voir le texte fondateur de Bloch, 1935). Les fouilles font aujourd'hui apparaître des milliers de moulins de la période antiques, qui est le moment de leur invention. Néanmoins, c'est le Moyen-Âge qui constitue les cours d'eau comme réseaux énergétiques. Un moulin, c'est en effet à la fois le dispositif qui tourne et l'exploitation d'une rivière. On ne peut pas s'approprier le courant d'un moulin, beaucoup de procès en font foi. L'autorisation de créer un moulin s'accompagne juridiquement de l'interdiction d'en construire d'autres. Sur les rivières autour de Paris, on a environ un moulin tous les 2 km. Autrement dit, on a saturé à peu près tous les cours d'eau. Comment est-on arrivé à ce résultat dans une société complexe ? Il faut savoir qu'on ne dispose souvent pas des actes de création des moulins. Le système est d'autant plus important qu'il ne peut pas vraiment s'installer en ville et que celles-ci sont vulnérables à la fois aux intermittences du réseau et à son extension dans les campagnes environnantes. Le cas de Paris est parlant : les ponts de la ville sont équipés de moulins flottants (ce qui est techniquement compliqué, le niveau de l'eau variant selon les saisons), qui lui assurent des capacités de meulage en cas de siège de la ville. En effet, le blé n'est pas comestible s'il n'est pas moulu. On craint donc la pénurie de céréales, mais aussi

l'incapacité à les moudre (le problème se reposera en 1870 avec le siège de Paris). D'où, à partir de 1180, dans le Cotentin (on ne sait pas très bien pourquoi à cet endroit, mais il est évident qu'il s'agit d'un transfert de technologie issu de la marine à voile), l'apparition des premiers moulins à vent, bonne alternative aux intermittences de l'hydraulique : en été en effet, si le débit est trop faible, en hiver si la rivière a gelé, les moulins à eau ne fonctionnent plus et il faut donc les compléter par une technologie différente. Très nettement, les moulins à eau sont bien plus nombreux que les moulins à vent. Ces derniers sont positionnés dans les régions les plus éloignées des cours d'eau. Nous avons perdu la notion de la complexité de ces mécanismes : dans un moulin, les meules doivent être parfaitement ajustées et parallèles sinon une meule broie l'autre et la farine est remplie de sable. Or, l'ajustement est difficile dans la mesure où le bois joue. Il y a de bons et de mauvais moulins, dont les loyers sont plus ou moins élevés, et qui engendrent un marché du travail des meuniers. On peut analyser leurs carrières : on ne confie pas un moulin à n'importe qui. Des appels d'offres sont lancés et les candidats sont soigneusement sélectionnés. Il y a là un domaine de recherche sur le fonctionnement d'une économie renouvelable qui nous ramène à notre question initiale : le *mix* énergétique et la transition. Le mystère ultime est là : comment le système a-t-il pu assurer une telle augmentation de la population (Paris passe de 300 000 habitants à 1 000 000 entre 1500 et 1800) ? Dans nos archives, nous avons un millénaire d'expériences, et d'expériences réussies et ratées. Il est intéressant de nous en inspirer pour penser le présent.

*Forgeron devant  
un haut fourneau  
(Fouta-Djallon)*



## DÉBAT

**Question :** *dans le livre, il y a un chapitre sur l'esclavage. Pouvez-vous revenir sur ce point ?*

**Réponse :** Il s'agit d'un très vieux problème. Il y a de l'esclavage jusqu'en l'an mille sur le continent, jusqu'en 1100 en Angleterre. Par esclavage, on entend de la main d'œuvre que l'on peut acheter et vendre. L'esclavage est incompatible avec la vision augustinienne de la Providence qui fonde les représentations médiévales. Avec le commentaire d'Augustin sur la *Genèse*, apparaît une figure incroyable en Europe : Adam travaillant dans le bonheur au paradis. Mon idée est que l'esclavage disparaît par décision. En tout cas, à partir de 1100, il ne reparait plus (la question va se poser : pourquoi ceux qui ont aboli l'esclavage dans le Nord de l'Europe l'ont-ils réintroduit plus tard, ailleurs ?). Le phénomène subsiste sur les côtes de la Méditerranée très tardivement (XVII<sup>e</sup> siècle en Sicile).

**Question :** *Comment sont gérées les forêts ?*

**Réponse :** Prenons le cas du Pays d'Ouche, en Normandie, vers 1300, au maximum de la croissance médiévale. Il existe localement 200 forges, chacune consommant 4,5 hectares de forêt par an. D'après nos sources, avec ce calcul, les forêts d'Orbec et de Saint-Évroult sont condamnées à échéance de dix ans. Si ces forêts ne sont pas mortes, c'est à cause de la peste noire (1348) : la population est divisée par deux en



un an. Cela résout instantanément les problèmes de ressources. La productivité du travail va exploser : on se reporte sur les meilleures terres et le cheptel, lui, n'a pas été touché par la peste. Se produit un phénomène impensable pour cette société : du blé ne trouve plus preneur et des paysans se retrouvent au chômage. La peste revient en 1360 et tue quasiment tous les enfants. Dans une société chrétienne on voit des adaptations morales sur les remariages des veuves, la reconnaissance des enfants naturels, assez étonnantes. Pourtant, la société ne se désagrège pas : les gens continuent à payer l'impôt. Mais on adapte pour faire survivre des orphelins par rapport à des parents qui n'ont plus d'enfants. On constate une hausse constante de l'alphabétisation, de la monétarisation, des budgets des États (qui continuent à construire des universités). Les villes moyenâgeuses qui demeurent aujourd'hui sont des villes d'après la peste noire, elles résultent de l'investissement qui a suivi.

**Question : Pouvez-vous revenir sur les courbes exponentielles ?**

**Réponse :** Il est intéressant de constater que l'hypothèse peste noire est généralement exclue par les experts en prospective. Rejeter les scénarios catastrophiques, c'est prendre ses désirs comme base de réflexion. Est-ce raisonnable ? Pour qui a visité Pékin dans les deux dernières années, il est évident que la pollution en Chine ne peut pas durer sans menacer l'existence même du système. Un changement va advenir, avant même que nous ne parvenions aux niveaux redoutés de l'évolution exponentielle du réchauffement climatique ou de la consommation énergétique. C'est l'une des raisons pour lesquelles le raisonnement par fonction exponentielle n'est pas raisonnable : des solutions adviennent avant que le niveau redouté ne soit atteint. Dans le cas médiéval, la famine de 1315-1317 a coûté peut-être un quart de la population du Nord de l'Europe au terme de trois siècles de croissance. Les historiens discutent pour savoir si le phénomène est endogène, malthusien ou aléatoire (on n'avait pas pu planter parce qu'il avait plu de manière continue durant deux années de suite). Ce dont on est sûr, c'est qu'il influe sur la situation et modifie durablement les choix offerts aux acteurs. Nous ne sommes probablement pas si loin de situations de ce genre. Notre imagination va être mise à l'épreuve. L'histoire, dans toute sa durée, peut servir à la stimuler ■

## Références

- Allen Robert (2009) *The British Revolution in Global Perspective*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Appia Béatrice (1965) "Les forgerons du Fouta-Djallon", *Journal de la société des africanistes*, vol. 35, n° 2, pp. 317-352.
- Arnoux Mathieu (2012) *Le Temps des laboureurs. Travail, croissance et ordre social en Europe (XI<sup>e</sup>-XIV<sup>e</sup> siècles)*, Paris, Albin Michel (coll. 'L'Évolution de l'Humanité').
- Arnoux Mathieu (2014) "European steel vs chinese cast-iron: from technological change to social and political choices (fourth century BC to eighteenth century AD)" in Inkster Ian [ed] *History of Technology*. vol. 32, London, Bloomsbury, pp. 297-312.
- Arnoux Mathieu (2015) "200 000 ans de transition énergétique", *L'Histoire*, n° 408, pp. 8-15.
- Bloch Marc (1935) "Avènement et conquête du moulin à eau", *Annales*, vol. VII, pp. 538-563.
- Gille Bertrand (1978) *Histoire des techniques : Technique et civilisations, technique et sciences*, Paris, La Pléiade.
- Hunter Louis C. (1979) *Waterpower in the Century of the Steam Engine*, Charlottesville (VA), University Press of Virginia.
- Kander Astrid, Malanima Paolo & Warde Paul (2014) *Power to the People: Energy in Europe over the Last Five Centuries*, Princeton (NJ), Princeton University Press.

Leroi-Gourhan André (1943) *L'homme et la matière*, Paris, Albin Michel.

Pomeranz Kenneth (2010) *Une grande divergence. La Chine, l'Europe et la construction de l'économie mondiale*, Paris, Albin Michel.