

ÉNERGIE, POLLUTION DE L'AIR ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

Claude Ronneau

Chapitre 2

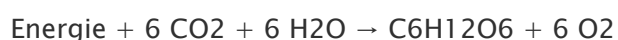
1. Introduction

Un bref parcours historique relatif à l'énergie doit être présenté. Cette démarche devrait apporter bien des leçons susceptibles d'évacuer certaines illusions sur la capacité des ressources renouvelables à nous tirer d'embarras dans la perspective d'un développement durable. Nous devons aussi, dans une seconde partie, parler de l'évolution des ressources alimentaires (notre source d'énergie corporelle) qui, progressivement, et surtout depuis le milieu du 20^e siècle, ont permis une croissance démographique inouïe laquelle, à son tour, a suscité une amplification extraordinaire de la demande en énergie.

LES RESSOURCES ENERGETIQUES DE LA PLANETE

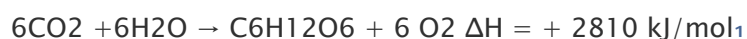
2. A l'origine, il y a le soleil

Les radiations solaires ont été pratiquement la seule source d'énergie pour les sociétés préindustrielles. Les photons émis par le soleil, se convertissent en énergie thermique pour maintenir la température moyenne de la terre à 15°C. Cette énergie est à l'origine du vent. Elle évapore les eaux océaniques et continentales et, grâce au vent, distribue l'eau douce sur les continents lorsqu'elle retombe en pluie ou en neige. Le soleil active aussi la photosynthèse, source primaire d'énergie des systèmes vivants. C'est un processus biologique apparu il y a 3,8 milliards d'années, qui a permis l'explosion de la vie au départ d'une réaction, à première vue banale, mais qui, à vrai dire, implique un énorme investissement en énergie solaire : il s'agit de l'élaboration des sucres schématisée, dans le cas du glucose (C₆H₁₂O₆), par :

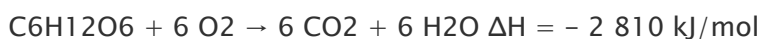


L'apport d'énergie nécessaire au déroulement de la réaction (2810 kJ par mole de sucre formée, soit 180 g) signifie bien entendu que les produits de la réaction

contiennent *plus* d'énergie que les réactifs ce qui, en chimie, se symbolise par l'écriture suivante :



En situation normale, toute consommation d'énergie dans notre corps se réalise par la réaction inverse qui oxyde le glycogène, un polymère du glucose, pour le ramener à l'état de dioxyde de carbone et d'eau. Par ailleurs, cette oxydation se réalise lors de la décomposition de la matière vivante mais aussi, très vivement, lors de la combustion du bois (la cellulose est un polysaccharide) : elle n'est que l'inversion de la réaction d'élaboration des sucres, à la différence près qu'elle se déroule ici à haute température et aboutit à restituer l'énergie thermique absorbée lors de la synthèse :



Il vaut la peine d'insister sur l'extraordinaire importance que revêt, pour notre existence, la réaction de synthèse des sucres qui met en œuvre cinq facteurs essentiels :

- **Les réactifs** qui sont directement accessibles pour les végétaux : l'eau est omniprésente sur terre et le dioxyde de carbone (CO₂), un gaz relativement abondant dans l'atmosphère émis par les volcans et par la respiration et qui constitue le « déchet » principal de la combustion vive et de l'oxydation microbienne de toute matière organique.
- **Le soleil** qui constitue la source d'énergie requise pour activer cette réaction, par l'intermédiaire de la chlorophylle. Il faut souligner qu'aucune installation industrielle, fût-elle équipée de la technologie la plus évoluée et disposant de sources d'énergie en suffisance, n'est capable de mener à bien, de manière économiquement satisfaisante, une réaction aussi exigeante en investissement énergétique. Beaucoup d'efforts ont été consentis pour tenter de reproduire cette synthèse chlorophyllienne en laboratoire, sous conditions contrôlées, ... avec très peu de succès jusqu'à ce jour.
- Il fallait aussi que la nature ait développé un mécanisme très élaboré de « remontée » progressive des réactifs hors de leur puits de potentiel pour aboutir au sucre car toute la photosynthèse se déroule à la température ambiante. Et c'est là qu'intervient la **chlorophylle**, mise au point par les processus de l'évolution, nous l'avons dit, il y a quelque 3,8 milliards d'années. Cette molécule extraordinaire intercepte une faible fraction de l'énergie de la lumière solaire et la transforme en énergie électronique qu'elle va utiliser, en association avec bien d'autres acteurs travaillant en interconnexion, pour transformer l'eau et le dioxyde de carbone en sucres. Ces sucres

sont la source d'énergie chimique à partir de laquelle sont élaborées pratiquement toutes les autres substances biologiques.

- Le dégagement d'oxygène, produit de cette réaction, va initier la formation, dans la stratosphère, d'une couche d'**ozone** qui, en interceptant la majorité des rayons ultraviolets nocifs, permettra à la vie, dans un premier temps, de diffuser vers la surface des mers, pour ensuite se propager sur les continents. C'était il y a quelque 10⁹ ans. Cet ozone, nous venons probablement de le sauver *in extremis* grâce au ban qui frappe à présent les CFC (chlorofluorocarbones) destructeurs de ce bouclier stratosphérique (Protocole de Montréal, en 1987).
- L'oxygène qui entre pour 21 % dans la composition de l'air a également permis que s'élabore la **respiration aérobie** (basée sur la consommation d'oxygène) dont l'efficacité énergétique est incomparablement supérieure à celle qui se déroule à l'abri de l'air (anaérobiose : putréfaction, certaines fermentations, ...)

Dès le moment où la vie s'est largement répandue dans les océans et sur les continents, une infime fraction des résidus organiques, séquestrés à l'abri de l'air au fond de mers peu profondes ou dans des tourbières, échappait à l'action de l'oxygène : ce processus préservait le carbone et l'hydrogène de la cellulose d'une dégradation (oxydation) en eau et en dioxyde de carbone. Des réserves d'énergie fossile se sont ainsi progressivement constituées. Les gisements de houille dérivent de fougères arbustives luxuriantes qui couvraient les marécages, abondants il y a 250 millions d'années, tandis que le pétrole a commencé à se former au fond de mers il y a environ un million d'années. Ce sont précisément ces réserves fossiles que les sociétés modernes sont en train d'épuiser alors que les sociétés préindustrielles, en exploitant la biomasse, n'ont jamais mis à contribution qu'une fraction infime du flux d'énergie solaire, par ailleurs inépuisable, qui baigne notre planète.

3. L'énergie mécanique primitive

La force musculaire humaine a été, pendant très longtemps, la seule source d'énergie mécanique directement disponible, bien avant la domestication du cheval et d'autres animaux de somme ou de trait. Mais les puissances ainsi mises en jeu sont toujours restées très faibles. Au mieux de sa forme, l'homme est capable de développer, pendant quelques heures de travail « lourd », une puissance de 60 à 70 W ; au maximum, 250 W pendant quelques minutes. On a commencé à utiliser des animaux pour le trait il y a quelque 6 000 ans : il s'agissait d'ânes et de chevaux. Le bœuf a été mis à contribution bien plus tard. Sous le joug, il s'active à raison de 200 W, tandis que le cheval, s'il est

équipé du collier d'épaule inventé au Moyen Age, peut tracter une charrette, une charrue en développant 600 W de puissance². Durant le Moyen Age, des innovations significatives ont quelque peu satisfait à la demande d'énergie mécanique. La machine hydraulique basée sur la roue à aubes (« moulin à eau »), connue depuis l'époque romaine, s'est multipliée suite à l'amélioration des conditions économiques. Au 17^e siècle, le moulin à vent fit son apparition au Portugal : il avait été inventé 500 ans auparavant en Perse. Il allait suppléer la roue à aubes dans les zones où les cours d'eau présentaient un débit trop faible ou une déclivité insuffisante. A la fin du 17^e siècle, il y avait en France environ 80.000 roues à aubes totalisant une puissance de 600 MW, l'équivalent de ce qu'auraient pu produire dix millions de travailleurs. Ce n'était pas négligeable ! Ces machines servaient en majorité pour la mouture des céréales ; elles alimentaient aussi en énergie mécanique les foulons (apprêt de la laine), les forges (martinets pour cingler le métal), les tanneries (pulvérisation des écorces de chêne) et, plus tard, les fabriques de pâte à papier (pulpage du bois).

Toutes ces sources d'énergie « renouvelables » avaient leurs limitations. Les moulins coûtaient très cher. Par ailleurs, les animaux de somme et de trait, à l'instar des autres animaux et de l'homme, « fonctionnent » à l'énergie solaire étant donné qu'ils puisent leur énergie alimentaire dans la végétation. On l'a dit, à l'époque où la traction chevaline était le plus puissant moteur des activités agricoles, garnir les râteliers exigeait de consacrer à la production d'herbe et d'avoine 25 à 30 % de la superficie cultivable ... Ces terres auraient pu mieux nourrir une population vivant en permanence aux limites de la carence alimentaire. On comprend aisément combien l'introduction de machines alimentées par l'énergie fossile a apporté un progrès sensible dans les rendements de la production agricole. Les machines ont permis de cultiver plus d'hectares pour l'alimentation humaine : en outre, elles travaillent bien plus longtemps et bien plus intensément que ne pouvaient le supporter les chevaux. Il est difficile de rester indifférent devant cette évidence : en réponse à notre soif actuelle d'énergie, au moment où l'on préconise le retour aux « cultures énergétiques », il est évident qu'un dilemme va se poser : alors qu'une grande partie de l'humanité souffre de carence alimentaire, va-t-on consacrer plus de terres à l'alimentation humaine ou à la culture d'énergie « renouvelable »³? Et il faudra garder à l'esprit que cette biomasse énergétique ne servira plus à assurer leur pitance à quelques équidés mais bien à satisfaire la voracité de centrales thermiques qui exigeront bien plus que quelques arpents de terre. En cette matière on ne peut ignorer les leçons du passé : quand le soleil était l'unique pourvoyeur d'énergie, la biomasse s'est trop souvent révélée insuffisante pour soutenir le

développement d'une humanité pourtant bien restreinte en comparaison de ce qu'elle est devenue.

4. La maîtrise de l'énergie thermique

L'aventure humaine de l'énergie débuta voici sans doute quelque 400.000 ans, lorsque l'homme parvint à maîtriser le feu. Il commença ainsi à polluer son environnement par les fumées de ses foyers. Pollution insignifiante en comparaison de celle que nous développons aujourd'hui mais pollution perceptible dans l'ambiance confinée des huttes où, autour du foyer commun, nos lointains ancêtres tentaient de se réchauffer tandis que leurs aliments se faisaient plus digestes, plus savoureux, sous l'effet de la cuisson.

L'homme a ensuite progressivement mis au point le four grâce auquel il a pu mieux contrôler la combustion. Le four conserve mieux la chaleur et permet ainsi d'atteindre des températures plus élevées. C'est certainement de manière fortuite que l'homme a découvert dans les cendres de ses foyers, de ses fours, des substances aux propriétés insolites : le plâtre, la chaux qui durcissent après avoir été mélangés à l'eau. Dans des foyers bien isolés, activés par un vent favorable, l'homme a découvert des masses vitreuses qui résultaient de réactions chimiques entre le sable et les cendres du bois. La révolution néolithique et l'agriculture – sa réalisation la plus significative – l'ont aussi amené à mettre au point, pour conserver ses réserves de céréales, des récipients étanches, incorruptibles et résistant aux rapines des rongeurs, ses concurrents directs. Cet impératif de conservation s'est concrétisé il y a sans doute 10.000 ans, avec la découverte de la cuisson des argiles malaxées avec du sable et de l'eau. Les céramiques entamaient ainsi une très longue carrière qui, actuellement encore, les situe parmi les matériaux les plus avancés de la technologie.

Les fours étaient le creuset dans lequel se formaient les premiers matériaux artificiels. Le four de potier est probablement aussi à l'origine de la métallurgie qui exige, non seulement des températures élevées, mais aussi une admission d'air contrôlée, afin de créer une atmosphère riche en monoxyde de carbone (CO), un gaz capable de réduire les oxydes métalliques en métaux. Si M symbolise un métal et MO son oxyde, au contact du monoxyde de carbone, il se produit, pourvu que la température soit suffisante :



L'or, l'argent et le cuivre natifs (trouvés à l'état métallique) étaient déjà connus au 7^e ou au 6^e millénaire avant J.-C. La métallurgie du cuivre par voie thermique n'a cependant démarré véritablement que vers 3000 avant J.-C. : elle a vite débouché sur la découverte,

sans doute elle aussi fortuite, du bronze d'antimoine et ensuite du bronze d'étain (l'airain du poète) bien plus utiles que le cuivre pur car ils sont plus durs. C'est à partir de cette première révolution métallurgique que les héros vantés par Homère ont pu s'armer d'épées meurtrières et de cuirasses invincibles. La technologie stimulait déjà les performances guerrières. Mais la fumée des fours était une pollution pour ces sorciers qui maîtrisaient la métallurgie du cuivre, du plomb, de l'étain. Les fumées des fours leur donnaient des yeux d'hallucinés, une peau livide, des dents grises et déchaussées. Ces premiers maîtres fondeurs furent aussi les premières victimes de la toxicité des métaux lourds.

Le fer est apparu plus tard, vers 1 100 avant J.-C., parce que sa réduction par le CO exige des températures encore plus élevées et, dans ce cas, il était nécessaire de souffler de l'air dans les fours pour en activer la flamme. La température des fours avait également crû dès lors que l'on commença à les alimenter avec du charbon obtenu par chauffage du bois à l'abri de l'air. Le charbon de bois est un combustible intéressant en métallurgie car sa densité énergétique est plus élevée que celle du bois et sa combustion est « propre ». Il ne dégage pas de fumées et se révèle aussi idéal pour la cuisson des aliments. Mais la production de 1 kg de charbon de bois exige de 4 à 7 kg de bois sec. Dès son apparition, la métallurgie a prélevé un lourd tribut sur les forêts, surtout quand elles alimentaient des fours primitifs aux rendements médiocres. Les Romains consommaient environ 90 kg de bois pour produire 1 kg de cuivre. Des fours de plus en plus puissants, plus efficaces, ont sensiblement amélioré les rendements. Si, pour produire 1 kg de fer, il fallait brûler 25 kg de bois dans les fours anciens, on passe à 10–20 kg au Moyen Age et à 8 kg vers 1 700, dans les hauts-fourneaux. Pendant longtemps, le coût de production élevé des métaux en a réservé la propriété aux plus nantis !

5. Une inévitable crise de l'énergie

Très tôt, le pourtour méditerranéen a subi le poids du développement des civilisations qui y ont fleuri. Construire les palais, les temples et les bateaux qui cabotaient des Colonnes d'Hercule à Byzance nécessitait de sacrifier les majestueux cèdres du Liban que les Phéniciens ont exploités à outrance. Plus tard, au cours du Moyen Age, le centre de gravité de la civilisation occidentale se déplaça progressivement du bassin méditerranéen vers le nord-ouest européen. Outre le défrichement des forêts imposé par l'extension des terres agricoles, il fallait construire des villes pour accueillir une population en croissance, le plus souvent dans des demeures faites de bois et de torchis. Les cathédrales, orgueil des bourgeois, exigeaient pour leur charpente le sacrifice de centaines de chênes. Les maîtres

architectes rivalisaient d'ailleurs d'ingéniosité pour réduire l'ampleur des échafaudages : on accrochait aux murs les cintres qui soutenaient les voûtes en construction. Il fallait du charroi, des barges pour soutenir les échanges commerciaux, des tonneaux pour conserver et transporter le vin et la bière. Assurer une fourniture suffisante et permanente de combustible à une grande ville de 100.000 habitants, telle que Paris, nécessitait une superficie forestière *200 fois supérieure* à celle de la cité. Le massacre des forêts trouvait d'ailleurs de bons arguments dans la Bible qui proclamait que la nature doit être au service de l'être humain. Cette arrogance à l'encontre de la nature se doublait du sentiment que les forêts étaient lieux abominables, refuges de démons, repaires de voyous. Le déboisement a désertifié le pourtour de toutes les villes de quelque importance en Europe : ces villes ont alors dû importer du bois de Russie, de Scandinavie.

Dès le 16^e siècle, l'Europe tout entière avait subi une déforestation massive. Le défrichement se poursuivait plus à l'est, par essartage, par brûlis, de manière à fertiliser les terres grâce aux cendres. Des forêts entières avaient été saccagées : pillées par les charbonniers, les charpentiers, par les chantiers navals. La perte de l'Invincible Armada en 1588 signifiait aussi l'inutile sacrifice de milliers de chênes. Les forêts n'arrivaient plus à alimenter une industrie naissante et l'Europe connut sa première crise de l'énergie au moment où elle réalisait ses premiers exploits techniques. Cette crise menaçait une matière première stratégique : le bois, matériau universel, l'équivalent tout à la fois de notre pétrole et de notre acier. A la fin du 16^e siècle, l'Europe occidentale avait presque épuisé ses forêts au moment où elle entamait la conquête du monde.

6. Une crise historique : l'Angleterre doit recourir au charbon

L'Angleterre fut la première nation à éprouver une disette qui menaçait directement sa puissance économique, militaire et maritime. L'inflation des prix du bois, la menace pesant sur les constructions navales incitèrent à utiliser plus largement qu'avant une « pierre noire » qui brûlait comme le charbon (de bois) mais en dégageant une fumée âcre, déplaisante, sulfureuse. Le charbon de terre (earth coal), connu depuis très longtemps là où il affleurait, s'imposait ainsi malgré les désagréments liés à son emploi. L'invasion du charbon atteste la première crise de l'énergie décrite dans l'histoire ; une crise aiguë qui imposait un revirement complet des traditions industrielles. Elle frappait un pays dont les ressources tenaient principalement à la disponibilité du bois : combustible et matériau de construction. Le charbon de terre (la houille) allait progressivement s'imposer pour plus

de deux siècles, et sans doute au-delà, en dépit de l'éclipse passagère que lui fera connaître, bien plus tard, un autre combustible encore plus étonnant, le pétrole.

Le charbon ne plaisait pas : il est extrait du sol, empire des démons. Il brûle avec des relents soufrés et la pestilence de ses fumées provoque la répulsion. L'usage du charbon était réservé aux pauvres : les gens riches continuaient à lui préférer le charbon de bois dont la combustion est moins déplaisante. La ville de Londres fut une victime célèbre des émanations produites par le chauffage au charbon. D'une manière générale, les villes anglaises souffraient de l'insalubrité de leur atmosphère, surtout en période hivernale, lorsque des brouillards suffocants recouvraient les grandes agglomérations. Le vocable « smog » est né de la contraction de « smoke » (fumée) et « fog » (brouillard) ; il allait acquérir une sinistre réputation de tueur sournois. Un des tout derniers smog, celui de décembre 1952, fut responsable de 4 000 décès à Londres.

L'Angleterre avait accompli sa conversion du bois au charbon avant la fin du 17^e siècle : elle y était contrainte. Se manifestaient ainsi cruellement les limites de l'utilisation de la biomasse pour le développement d'une nation en voie d'industrialisation. A l'instar du bois, on peut épurer le charbon en le chauffant à l'abri de l'air : on en fait du coke. Abraham Darby utilisa le coke pour produire de la fonte en 1709. Dans la sidérurgie anglaise, le coke l'emporta sur le charbon de bois dès 1750. D'autres pays vont suivre la voie tracée par l'Angleterre : la Belgique (où l'extraction du charbon est attestée dès le 12^e siècle), l'Allemagne, la France, et, enfin les Etats-Unis d'Amérique. En 1810, les sidérurgistes américains utilisaient annuellement une quantité d'arbres couvrant une superficie de 2 500 km². En 1885, deux cents ans après l'Angleterre, l'épuisement des forêts américaines imposait enfin le recours au charbon⁵. D'autres débouchés se profilent bientôt pour lui : on produit du « gaz de ville » en faisant réagir de la vapeur d'eau sur du charbon incandescent :



Au 19^e siècle, le « gaz à tous les étages » apportait progressivement un supplément de bien-être dans les demeures les plus confortables des grandes villes européennes.

La machine à vapeur de Watt, qui connaît un succès croissant à partir de 1770 amplifie le rôle du charbon qu'affirme peu après la machine à vapeur sous pression apparue en 1800. Celle-ci est plus légère, donc adaptable à la propulsion d'engins tels que des bateaux dont l'ingénieur américain Robert Fulton entame la production industrielle en 1807. Au cours du 19^e siècle, le coût des transports transocéaniques chuta de 85 %. Le débouché sans doute le plus significatif de la chaudière à pression fut son adaptation à la

locomotive. Le premier de ces engins fut mis au point par Richard Trevithick en 1803. Mais c'est à George Stephenson que revient le mérite d'avoir compris que les roues des locomotives pouvaient adhérer suffisamment à des rails d'acier pour assurer la substitution de la traction animale des wagons par la traction à vapeur (1813). Sa réalisation la plus célèbre fut la « Rocket » mise sur rails en 1825. Auparavant, le cheminement des marchandises et des personnes se faisait à une vitesse maximale de 8 km par heure : en quelques décennies, la locomotive à vapeur porta la vitesse à 60–75 km/h. Un réseau de plus en plus dense de voies ferrées, organisé grâce au télégraphe électrique, donna naissance à de nouveaux sites industriels. Dès lors, la baisse des coûts d'acheminement des marchandises déboucha sur un essor phénoménal de l'échange des produits industriels et alimentaires. La mondialisation s'installait.

Cette remarquable floraison de machines diverses, dès le début du 19^e siècle, a entraîné la nécessité d'extraire plus de charbon de mines en pleine expansion. A cette époque, l'Angleterre avait entamé la Révolution Industrielle qui allait bientôt submerger le monde occidental.

7. La révolution industrielle en Angleterre

Les ferments de la plus importantes des révolutions qu'ait connues l'humanité depuis le Néolithique se trouvaient réunis dans l'Europe du 18^e siècle. Dans la foulée des grands explorateurs, elle avait étendu sur le monde entier un tissu de relations commerciales qui faisaient croître sa richesse. Les gouvernements prenaient soin d'assurer au commerce toutes les conditions nécessaires pour lui garantir un développement stable, sans entraves. Un facteur tout aussi important était la croissance démographique qui préparait la réserve de main d'œuvre dans laquelle allaient bientôt puiser les maîtres de l'industrie.

C'est en Angleterre et en Ecosse que s'initia la révolution : tout d'abord parce que l'économie s'y était développée plus qu'ailleurs et que le niveau de vie y était plus élevé. Le système des « enclosures », en accroissant la superficie des parcelles cultivables, avait débouché sur une réforme importante de l'agriculture et donné de meilleurs rendements, nourrissant une population en croissance. Il se créait une réserve monétaire importante, une richesse perçue comme une fin en soi, un idéal à poursuivre. Le capitalisme acquérait ses lettres de noblesse et donnait au pays la capacité d'investir dans des innovations techniques. Vers 1780, la flotte marchande de l'Angleterre et l'ampleur de ses marchés la plaçaient au centre de gravité du commerce mondial : elle était mûre pour entamer la révolution industrielle.

Les chefs d'entreprise et les inventeurs saisirent l'occasion pour remanier profondément quelques secteurs de production, par exemple, les filatures du coton dont la productivité fut amplifiée d'une manière extraordinaire. Des innovations techniques permirent aux machines de supplanter la main d'œuvre individuelle : depuis le Moyen Age, le filage et le tissage des fibres textiles se réalisaient à la campagne, dans le monde des agriculteurs qui y trouvaient un supplément de revenus. Progressivement, les innovations techniques accumulées durant le 18^e siècle, la navette volante, la machine à filer (« spinning jenny »), firent en sorte que les machines devenaient singulièrement plus productives que la masse des paysans laborieux. Ces innovations provoquèrent une concentration de la production dans des filatures (alimentées, dans un premier temps par des moulins à eau) où la productivité était plus que décuplée. En 1760, l'Angleterre importait 2,5 10⁶ livres de coton brut ; 77 ans plus tard, elle en était à 366 10⁶ livres.

D'autres innovations s'imposèrent dans d'autres domaines sans cependant atteindre les sommets de l'industrie du coton. La sidérurgie, en particulier, connut sa part de progrès. La demande avait été exacerbée par les guerres qui avaient ensanglanté l'Europe à la fin du 18^e siècle. Cette demande avait exigé d'exploiter les mines de charbon plus en profondeur, et il fallait en assurer l'exhaure : la machine à vapeur de Newcomen y avait été mise à l'œuvre dès 1711. On l'a dit, elle fut supplantée par la machine de Watt dont le rendement était incomparablement meilleur. En même temps, la machine à vapeur permettait aux industries de s'affranchir de la dépendance des cours d'eau qui, jusque là, actionnaient les roues à aubes. Grâce au charbon, les industries s'émancipaient aussi des forêts. Des usines purent ainsi se disséminer sur de plus vastes territoires pour investir des zones mieux adaptées à la production, disposant de main-d'œuvre.

La machine à vapeur fut vraiment le catalyseur d'une explosion de la puissance industrielle : avec cette amplification inouïe de l'énergie mécanique, toute entreprise semblait possible. En 1851, au « Crystal Palace » édifié pour la circonstance à Londres, l'Angleterre étalait devant le monde entier les fruits de son développement⁶ : à cette époque, elle produisait 2,5 millions de tonnes de fer et ses machines à vapeur développaient 1,2 millions de chevaux-vapeur (880 GW) soit plus de la moitié du potentiel européen.

8. L'irrésistible émergence du pétrole

Le pétrole (huile de roche) est connu depuis la plus haute antiquité : il suintait dans les sables du Moyen-Orient et le bitume qui stagnait après évaporation de ses constituants légers a très tôt servi à fabriquer des torches et à calfater les barques en Mésopotamie.

La production industrielle ne débuta réellement qu'en 1859 à Oil Creek, aux Etats-Unis où Edwin Drake forait le premier puits produisant une huile dont, à l'époque, on ne récupérait que le « pétrole lampant », mieux connu et apprécié aujourd'hui en tant que kérosène, le combustible des avions à réaction. Très vite, on se rendit compte de l'intérêt qu'il y avait à valoriser d'autres fractions du pétrole, à condition de les raffiner. On y reviendra : à poids égal, les dérivés du pétrole contiennent environ 40 % d'énergie en plus que le charbon. En outre, ce sont des liquides qu'il est bien plus aisé de traiter, de transporter et de stocker que le charbon. C'est dans cet assortiment de qualités qu'il faut comprendre le succès actuel des dérivés du pétrole.

9. L'amplification des ressources mécaniques : fin du 19^e siècle

L'intérêt des dérivés du pétrole n'était pas vraiment manifeste pour l'alimentation en énergie des machines à vapeur. En revanche, la mise au point du moteur à combustion interne (moteur à bougie ou « à allumage commandé ») par Gottlieb Daimler en 1885 imposait l'utilisation de combustibles liquides volatils. Huit ans plus tard, Rudolf Diesel faisait breveter un moteur à haute pression dont il réalisa le premier exemplaire en 1897. La densité de puissance offerte par le moteur à combustion interne permit aux frères Wilbur et Orville Wright de faire voler le premier engin plus lourd que l'air en 1903, exploit que ne permettait pas la machine à vapeur, trop lourde. L'impulsion était donnée à un extraordinaire déploiement de tous ces moyens de production d'énergie mécanique dont allait bien vite se gaver l'humanité. D'autres innovations allaient également amplifier le mouvement. Thomas Edison, par exemple, fut le promoteur de la production d'énergie électrique (à courant continu) à grande échelle, dès 1882. Cette production fut largement soutenue par l'invention de la turbine à vapeur (Charles Parsons, 1884), par l'invention du transformateur électrique (William Stanley, 1886) et du moteur à induction à courant alternatif (Nikola Tesla, 1888). Enfin, en 1891, Westinghouse distribua pour la première fois du courant alternatif : celui-ci l'emportera sur le courant continu car il est possible de l'amener au voltage souhaité par un transformateur. En transportant le courant électrique sous haute tension, on réduit les pertes thermiques dans les fils conducteurs.

Toutes ces percées technologiques ont ouvert un marché énorme pour la production d'énergie électrique et donc pour la consommation de charbon et de fuel. Le gaz naturel, quant à lui, n'a vraiment émergé de l'anonymat qu'à partir de 1950 lorsqu'ont été adoptés des moyens d'exploitation, de transport et de manutention adéquats et lorsque les besoins en énergie n'ont plus toléré que ce gaz soit gaspillé dans des torchères au cœur

des déserts d'Afrique et du Moyen-Orient. Ces avancées se sont évidemment répercutées directement sur la production d'énergie fossile : alors que, en 1800, l'extraction du charbon et de la tourbe dans le monde se montait à environ 30 millions de tonnes d'équivalent charbon (0,030 GTEC), on en était à 1 Gt en 1900 et à 2 Gt en 1940. En 1998, le seuil de 1 GTEC a été dépassé dans la seule Europe des Quinze. A l'échelle mondiale, la consommation en ce début de millénaire (2000) se monte à 8,75 GTEP par an (12,3 GTEC), ce qui représente 0,9 % de toutes les réserves prouvées de pétrole, de gaz et de charbon que recélait la planète avant l'ère industrielle.

En parallèle, les émissions de CO₂ ont suivi le rythme imposé par la consommation d'énergie fossile. Les quelques millions de tonnes (Mt) de carbone émises en 1700 sous forme de CO₂, étaient passées à 30 Mt cent ans plus tard. Au milieu du 19^e siècle, on en était à 70 Mt, à 500 Mt en 1900 et 1,6 Gt en 1950, date à laquelle la masse de carbone relâchée par le brûlage des combustibles fossiles était encore inférieure à celle attribuable à la déforestation et à la combustion de la biomasse. Durant la deuxième moitié du 20^e siècle, les choses se précipitent et les émissions anthropiques interfèrent alors significativement avec les cycles naturels du carbone. Jusque dans les années 1970, seuls les USA, le Canada, le Japon, l'Australie, la Nouvelle Zélande, l'Europe et l'URSS contribuaient significativement à l'impact. En 1950, ces pays regroupaient un tiers de la population mondiale mais consommaient les neuf dixièmes de l'énergie du marché. En 1990, ils ne constituent plus qu'un cinquième de la population mondiale mais requièrent encore plus des quatre cinquièmes de la production mondiale d'énergie.

Le deuxième choc énergétique qui se dessine depuis la seconde moitié du 20^e siècle a pour origine l'accroissement démographique des pays pauvres. En Asie, en Afrique et en Amérique latine l'accroissement est passé de 40 millions d'individus par an pendant les années 50, à 60 millions pendant les années 70 pour aboutir à 80 millions par an durant la dernière décennie. Certains de ces pays ont, au reste, connu un développement technologique impressionnant. L'exploitation des ressources fossiles a dû s'adapter au rythme de la productivité industrielle : mécanisation de l'exploitation souterraine du charbon, exploitations à ciel ouvert, exploration géophysique pour les gisements de pétrole, forages de plus en plus profonds en mer, construction d'oléoducs et de pétroliers gigantesques. Le gaz naturel a emboîté le pas : il est à présent transporté à basse température par des navires conteneurs (méthaniers) ou bien sous haute pression dans des gazoducs en acier.

La part des combustibles fossiles consacrée à la production d'électricité est passée de moins d'un dixième en 1945 à un tiers en 2000. Une installation de 1 GWe_s relâche dans

l'air 9 Mt de CO₂ par an c'est à dire autant que les feux alimentés au bois qui étaient requis pour subvenir aux besoins d'un million de gens au milieu du 19^e siècle.

Simultanément se mettaient en place des techniques de communication extraordinaires. Le télégraphe électrique, dont l'invention remonte au 19^e siècle et, peu après, le téléphone ont été (après le tam-tam) les premiers modes de télécommunication efficaces. Avant eux, la transmission de l'information dépendait d'un acheminement de dépêches assuré par des courriers à cheval ou en diligence. Ce fut un progrès immense quand le simple déplacement d'électrons dans des câbles put transférer l'information moyennant une consommation d'énergie de loin inférieure à celle demandée par le trot des chevaux courriers. Actuellement, avec l'aide de l'ordinateur, la densité d'informations qu'il est possible de transmettre par les câbles optiques dépasse tout ce qu'auraient pu imaginer Samuel Morse et Alexander Bell. De petits ordinateurs de bureau connectés entre eux s'échangent, par ligne téléphonique, plus de 30 millions de caractères par seconde.

LE DEVELOPPEMENT DES RESSOURCES ALIMENTAIRES

10. La révolution agricole du Néolithique⁹

La production alimentaire est à la base de la survie de l'homme : depuis la révolution du Néolithique, le développement des grandes civilisations humaines a été étroitement lié aux succès de l'agriculture. Bien que, en toute rigueur, le terme « néolithique » se rapporte à une technique de préparation d'outils de pierre, l'agriculture a été, sans conteste, la révolution la plus significative qui se soit manifestée durant cette période de l'histoire de l'humanité. Après des millénaires d'assujettissement aux aléas de la chasse et aux limitations de la cueillette, une révolution capitale se dessinait il y a 10.000 ans : l'être humain commençait alors à contrôler sa source d'énergie corporelle, il se sédentarisait pour devenir agriculteur. La constitution de réserves alimentaires lui permettait de réduire sa sujétion aux trop nombreux caprices d'un environnement sauvage qui restreignait strictement le nombre d'individus que la terre pouvait nourrir. L'homme pouvait alors s'émanciper de l'errance des migrations animales et constituer des réserves alimentaires faites de céréales.

Les civilisations agricoles les plus brillantes sont parvenues à nourrir, en moyenne, 1,5 individus par hectare de terre cultivée. C'est le cas de l'Égypte, « don du Nil », qui, année après année, jusqu'à l'édification du barrage d'Assouan, a été une des zones les plus

productives du monde. C'est le cas de la Mésopotamie, de la région de l'Indus qui, au contraire de l'Égypte, devaient irriguer leurs terres, sans la contrepartie du lessivage qu'assuraient les crues du Nil, et qui connurent ainsi des crises de productivité dues à la salinisation des sols. Des civilisations se sont étiolées parce que de trop rares précipitations ne pouvaient dissoudre l'excès de sel accumulé par l'évaporation des eaux d'irrigation. L'élan de productivité initié par le Néolithique permit l'accumulation de réserves alimentaires : il devenait possible de consacrer beaucoup plus de ressources humaines à d'autres projets que la consommation immédiate. Dans une société de chasseurs et de cueilleurs, des milliers d'hectares sont nécessaires pour sustenter une famille alors que l'agriculture primitive y parvenait avec trois ou quatre hectares. Des sociétés de type nouveau se sont créées dans lesquelles une organisation rigoureuse distribuait le travail et les fruits des récoltes. Elles ont dû, pour ce faire, inventer l'écriture, l'arpentage, la géométrie, le calendrier ... Des castes de spécialistes se constituèrent : il fallait des scribes pour gérer l'exploitation et l'irrigation des champs, pour répertorier les réserves de nourriture ; il fallait des géomètres pour cadastrer les terres, des soldats pour les défendre contre les rapines des nomades, des prêtres pour attirer la bienveillance des dieux et pour donner un sens à cette vie faite de règles et de stratification sociale. Bien entendu, il fallait un roi pontife, représentant des dieux sur terre. Les villes sont nées de la nécessité de centraliser toutes ces activités de gestion.

Une telle évolution n'est pas neutre pour le sujet qui nous occupe : en effet, l'idéal de l'accumulation, du rendement est né avec l'agriculture et il est progressivement devenu un moyen de plus en plus efficace de dominer le monde et ses ressources. D'ailleurs, la structuration de la société agricole fournissait les outils nécessaires pour y aboutir. Il fallait produire plus avec les ressources humaines disponibles et, simultanément, il fallait pouvoir consacrer plus de bras à des tâches annexes telles que l'édification de temples, de palais, de monuments destinés à éblouir. Il fallait aussi pouvoir écouler les surplus alimentaires : c'était une façon de convertir le blé en or, en pierres précieuses, en tissus de luxe pour la satisfaction des castes dirigeantes.

Mais, pendant des millénaires, les rendements agricoles ont été limités par les flux naturels de matière et d'énergie et par les restrictions qu'imposait le climat. En ce sens, l'être humain demeurait tributaire de conditions qu'il ne pouvait encore maîtriser : la salinisation des sols dont on a parlé mais aussi, dans les zones tropicales, le surpâturage, l'excès de déboisement qui étendent la désertification ... D'autres sociétés, par contre, ont connu de brillants résultats, grâce à des circonstances exceptionnelles sans doute, mais aussi grâce à une gestion stricte des flux de matières. Les Aztèques sont parvenus

à nourrir 10 individus par hectare de terre arable. La Chine du début du 19^e siècle a atteint des rendements du même ordre, en procédant à un recyclage intensif des déjections humaines et animales et par l'apport d'azote dû à la contribution d'algues telles que *Azolla*, capable de fixer l'azote atmosphérique ... Mais ce sont là des exceptions : au début du 18^e siècle, l'Europe arrivait, péniblement, à entretenir deux êtres humains pour chaque hectare de terre cultivée, soit à peine plus que l'Égypte ancienne mais, faut-il le souligner, dans des conditions bien moins favorables !

Mais, déjà, des économistes commençaient à entrevoir quelques limites aux ressources de la terre. Dans son « Essai sur le principe de population » publié en 1798, ouvrage avant tout destiné à justifier l'existence et les acquis de la « middle-class » britannique, Thomas Malthus présentait le danger d'une démographie incontrôlée confrontée aux limites des moyens de subsistance. Il ne pouvait évidemment, à cette époque, imaginer l'amplification des ressources agricoles qu'allaient apporter la chimie et le perfectionnement des techniques culturales. Malthus, semble-t-il, avait eu raison trop tôt !

11. Le rôle de « l'azote actif »

L'agriculture primitive avait ses limites : les restrictions fixées par le flux d'éléments vitaux vers les plantes, à savoir, l'azote, le phosphore et le potassium (N, P et K). Aussi favorables qu'aient pu être les conditions climatiques et pédologiques (température, ensoleillement, pluviosité, irrigation, structure, nature des sols, ...), les cultures exigeaient un apport simultané de ces trois éléments, en proportions convenables, et l'azote en était généralement le plus limitant. Le stock d'azote, de loin le plus important de notre planète, est l'atmosphère qui le véhicule sous la forme de la molécule N_2 , espèce chimique particulièrement inerte (peu réactive) que seules quelques plantes (des légumineuses) ou quelques réactions chimiques très énergiques (dans les flammes) parviennent à activer pour le transformer en une forme disponible pour les plantes, essentiellement le nitrate (NO_3^-) et l'ammoniac (NH_3). Pendant des millénaires, les agriculteurs se sont trouvés confrontés, à leur insu, à cette barrière imposée par la disponibilité de l'azote actif. De manière totalement empirique, ils ont découvert que le recyclage de déchets végétaux et animaux parvenait à améliorer les rendements de leurs champs. Les Chinois, 3.500 ans avant notre ère, ont constaté qu'un champ laissé en friche pendant toute une saison produisait plus lors de la moisson suivante : la terre avait eu le temps de se « reposer ». Les Chinois découvraient ainsi les vertus de l'assolement. Les

agriculteurs ont aussi remarqué que cultiver des légumineuses (pois, fèves, ...) enrichit le sol dont on tire alors plus de céréales.

On sait à présent que la friche, l'assolement, la culture de légumineuses, l'apport de déchets végétaux ou animaux, enrichissent le sol en dérivés actifs de l'azote. Mais bien qu'efficaces, ces processus connaissent une limitation dictée par le rythme des échanges de matière ... eux-mêmes imposés par les flux naturels : l'assolement réduit le nombre des moissons possibles ; l'apport de fumiers, de lisiers est limité par le nombre de bêtes qu'il est possible d'élever sur un lopin de terre, lui-même restreint par la concurrence des fermiers voisins, par l'accès aux pâtures, par les prétentions du Seigneur des lieux, des monastères ... Quoi que l'on ait pu entreprendre, les cycles naturels, le climat, la disponibilité et la qualité des terres dictaient les limites de la production alimentaire et la densité de la population qu'il était possible d'entretenir. Ces mêmes barrières sont à pressentir quand on parle des énergies renouvelables dont le flux est, lui aussi, limité par la puissance du rayonnement solaire, par les rendements de l'activité chlorophyllienne ...

12. La révolution agricole, du Moyen Age à l'Ere industrielle

En Europe, vers l'an mil, l'agriculture primitive avait atteint les limites des rendements agricoles fixés par quelques aménagements récents, en particulier l'assolement triennal. Des innovations techniques apparues au Moyen Age ont aussi quelque peu amélioré les rendements. Il s'est agi du collier d'épaule (collier d'attelage) et du fer à clous qui permettent de faire du cheval un animal de trait particulièrement efficace, bien plus productif que le bœuf. Il s'est agi aussi de la charrue à roue, équipée d'un coutre et d'un versoir, grâce à laquelle les sols peuvent être retournés et aérés sur une profondeur suffisante, tout en ensevelissant les mauvaises herbes et leurs graines. Ces charrues restaient cependant rudimentaires et l'acier dont elles étaient faites était un matériau coûteux au point que, seuls, quelques rares « *laboratores* » (laboureurs) pouvaient se payer l'équipement et le cheval nécessaire à la traction. Heureusement, la multiplication des moulins à eau et à vent, possession des riches et des monastères, est venue accélérer l'étape de la mouture qui, auparavant, se réalisait par une lente trituration dans des mortiers.

Cependant, ces améliorations, quoique significatives, ne pouvaient faire face aux besoins croissants d'une démographie qui allait commencer à faire de l'Europe une des régions les plus densément peuplées au monde. Et l'agriculture est devenue extensive par le défrichement des forêts, encore abondantes à ce moment de notre histoire. Il est difficile

d'apprécier exactement ce que fut cet envahissement mais il est certain que notre interférence dans le cycle du carbone fut telle que la perturbation induite à cette époque est la plus violente qui se soit manifestée depuis au moins 10.000 ans, soit depuis la naissance des sociétés à civilisation évoluée. L'interférence fut à la fois complexe et intense : elle intervint par la production des aliments, l'élevage, les pêcheries, la déforestation et la pratique du brûlis et de l'écobuage : ses conséquences vont se prolonger durant bien des générations à venir. La destruction des forêts entraînait aussi une réduction de leurs productions : miel, gibier, bois à brûler,... Des biologistes ont estimé que, il y a 5.000 ans, 1.100 Gt de carbone étaient stockées dans la biomasse terrestre. Les estimations pour la fin du 20^e siècle portent sur 420 à 840 Gt, avec une perte de quelque 100 Mt par an depuis le haut Moyen Age. La destruction systématique des forêts d'Europe s'est amplifiée au début du 13^e siècle avec le développement de la construction navale et les besoins de la métallurgie en charbon de bois, nous l'avons dit. La superficie des terres défrichées est passée de 260 Mha en 1700 à 540 Mha en 1850, aux dépens presque exclusifs de zones boisées, bien que les zones humides y aient aussi apporté leur tribut. Les pays les plus « dynamiques » en ce sens furent la Russie (60 Mha), la Chine (50 Mha) et les EU (presque 50 Mha). Aux USA, les colons et leurs descendants ont éliminé environ 460.000 km² de forêts entre 1650 et 1850 et presque 800.000 km² entre 1850 et 1910, suite au doublement de la population.

Il faut se rendre compte que le changement du couvert végétal peut affecter gravement les équilibres chimiques entre le sol et l'atmosphère. Une forêt tempérée, à maturité, est susceptible de stocker de 100 à 200 t de carbone par ha tandis qu'un champ de céréales du Moyen-âge n'en retiendrait que de 2 à 4 t/ha à la moisson, après 4 à 6 mois de croissance. Même la mise en culture de la steppe peut se révéler catastrophique : en effet, étant donné le développement de leurs racines, les herbes de la steppe emmagasinent bien plus de carbone qu'un champ de céréales.

13. L'agriculture à l'époque moderne

Dans les sociétés préindustrielles, grâce à l'assolement et à la rotation des cultures (fertilisation par les légumineuses), et sous des climats ne permettant qu'une seule récolte par an, un hectare de culture fournissait les protéines nécessaires pour la survie de deux personnes. Au début du 19^e siècle, grâce à un recyclage rigoureux des déchets végétaux et animaux, les plus hauts rendements permettaient de nourrir cinq personnes par hectare (avec, cependant, une alimentation assez riche en protéines –viande et produits laitiers). La production de fourrage permettait l'élevage de bestiaux et, en conséquence,

l'enrichissement des sols par le fumier, matière de grande valeur à cette époque ! Cette amélioration sensible des rendements agricoles a rendu possible un transfert de main-d'œuvre de la campagne vers les usines qui se multipliaient alors en Europe : elle est donc venue à point pour soutenir la révolution industrielle. Mais on avait alors atteint un maximum dans les possibilités d'apport de nutriments naturels et, en particulier, l'apport d'azote. La révolution industrielle qui s'amplifiait, avide de main-d'œuvre, allait exiger encore plus de rendements. Dans un premier temps, la culture de la pomme de terre au nord et du maïs au sud allait apporter un embryon de solution.

Au début du 19^e siècle, l'envahissement des terres cultivables de l'Europe, aux dépens des forêts, avait donc atteint les limites du possible ; l'agriculture extensive, facilitée par l'invention de la moissonneuse (McCormick, 1831) atteignait alors les bornes fixées par la superficie du continent. Cependant, l'agriculture devenait scientifique et, suite aux travaux de J. von Liebig, les agronomes apprirent à comprendre en quoi la disponibilité des nutriments réglait les rendements. Ils se rendirent bien vite compte qu'il y avait à présent à franchir une barrière d'un type inédit : ces surplus que l'agriculture ne pouvait plus produire par l'extension des terres cultivées, il fallait les susciter par un accroissement des apports de nutriments et, en particulier, de l'azote. On se mit à exploiter les ressources fossiles d'azote actif : le salpêtre du Chili, les gisements de guano ... on récupéra un sous-produit des cokeries, le sulfate d'ammonium. Mais, malgré quelques progrès sensibles, les rendements des terres se révélaient encore trop modestes.

14. La synthèse industrielle de l'ammoniac

C'est alors qu'intervint le procédé de synthèse industrielle mis au point en 1913 par le chimiste allemand Fritz Haber en association avec l'ingénieur Karl Bosch. Et si nous nous y attardons quelque peu, c'est qu'il s'agit de l'archétype d'un développement industriel fulgurant qui exerça et continuera d'exercer de profondes répercussions sur l'humanité et son environnement. La synthèse consiste à unir directement l'hydrogène à l'azote extrait de l'air :



La réalisation industrielle de cette réaction, très simple en apparence, exigea un investissement considérable en recherche et en mises au point ardues qui s'étalèrent sur une dizaine d'années. La réaction dégage de l'énergie thermique (facteur favorable) : elle doit donc se dérouler à la température la plus basse possible. Par contre, elle

s'accompagne d'une réduction du volume des gaz (diminution de l'entropie du système –facteur défavorable) : elle aboutit donc à un équilibre et, aux basses températures auxquelles l'équilibre serait favorable, la réaction est, en quelque sorte, « gelée » au point que sa vitesse devient tout à fait négligeable. Haber et Bosch adoptèrent donc un compromis qui consiste à travailler à une température modérée (400°C), sous haute pression, avec l'activation d'un catalyseur. Ce fut un succès extraordinaire, surtout lorsque les conditions de production permirent d'abaisser sensiblement le prix de l'ammoniac¹³. Les premières installations de synthèse exigeaient 15 kg de charbon pour produire 1 kg d'ammoniac. Le charbon fournissait l'hydrogène par la réaction du « gaz à l'eau » (v. chap. 3), il procurait l'énergie thermique pour porter les réactifs à la température requise et il servait à produire l'électricité qui alimentait les compresseurs. En 1950, des unités utilisant le gaz naturel comme source d'hydrogène ne demandaient plus que 5 kg d'équivalent charbon (EC). Dans les années 1990, un kg de NH₃ était produit moyennant la consommation de 1 kg d'EC. Ceci explique pourquoi le procédé de Haber et Bosch ne s'imposa vraiment que dans la deuxième moitié du 20^e siècle où la production adopta une allure exponentielle. Signalons au passage que cette production qui se réalise actuellement au prix d'une dépense énergétique de 30 MJ par kg de NH₃, fait de l'ammoniac quasi l'équivalent d'un dérivé liquide du pétrole. Soulignons encore que l'hydrogène qui alimente les réacteurs de Haber–Bosch est produit par vaporeformage du méthane (CH₄) contenu dans le gaz naturel : un combustible fossile « propre », très prisé actuellement ; trop, peut-être. Nourrir l'humanité exige beaucoup d'énergie fossile et pas seulement de l'énergie solaire !

La production mondiale d'ammoniac était de 10 Mt à la fin des années cinquante ; elle avait quadruplé en 1975 et doubla encore jusqu'en 1990. En 1995, les pays pauvres appliquaient 60 % de tout l'azote consommé dans le monde. Actuellement, la Chine est devenue le principal producteur mondial d'ammoniac et 550 millions de Chinois dépendent directement de cette synthèse industrielle. Sans le procédé de Haber et Bosch, il est manifeste que la population mondiale n'aurait jamais pu dépasser, soyons très optimistes, le cap des 5 milliards d'humains. Au début des années 90, les terres agricoles mondiales recevaient 175 Mt d'azote et les composés synthétiques représentaient 45 % de ce total. Mais si on garde à l'esprit que les fumiers et autres apports organiques dérivent, eux aussi, d'engrais artificiels, on peut affirmer que les trois-quarts de l'azote présent dans la nourriture –et donc dans notre corps – sont d'origine artificielle, le reste provenant des pêcheries et des productions marginales de viandes et de plantes. On en est arrivé au stade où un hectare de terre agricole est à présent capable de sustenter 20

personnes sur base d'un régime riche en protéines et jusqu'à 30 personnes pour une diète végétarienne.

Entre 1975 et 1995, la superficie des terres arables du monde est passée de 0,32 à 0,24 ha par habitant¹⁵ alors que la population n'a cessé de croître ! On doit donc constater que la révolution apportée par la synthèse de l'azote « actif » – soutenue par la mise au point de pesticides performants et par la sélection d'espèces plus productives – en propulsant les rendements agricoles à des sommets exceptionnels, a permis de soutenir l'existence des 6 milliards d'humains qui peuplent la planète. On est bien loin de l'idéal prôné par l'agriculture « biologique » !

Malheureusement, ce succès technique offre la contrepartie d'une pollution qui menace une source essentielle de notre bien-être, à savoir l'eau potable. En effet, les nitrates épandus en surabondance sur d'énormes superficies de terres agricoles diffusent lentement dans les sols, entraînés par les eaux de percolation vers les nappes phréatiques. Il faut savoir que les plantes n'assimilent en moyenne que 50 % de l'azote épandu sur les sols. En outre, le développement de l'élevage porcin et bovin aboutit à la production de tonnages énormes de déchets riches en azote qui, très logiquement, doivent venir enrichir les terres agricoles. Il se crée ainsi un tel surplus dans certaines régions d'élevage intensif que les terres sont sursaturées en dérivés azotés au point de constituer un problème démesuré pour la qualité des eaux souterraines et pour l'air ambiant. En Hollande, pays qui emporte la palme de ce point de vue, les émissions de NH₃ gazeux se montent à 60 kg par an et par hectare. La Belgique n'est pas beaucoup mieux lotie, de même, d'ailleurs, que le Danemark, la Normandie, la Bavière ... En 1999, l'Europe des quinze a émis dans l'atmosphère un peu plus de 3,5 millions de tonnes d'ammoniac !

Une autre source d'azote actif est l'oxyde d'azote produit par la combustion à haute température qui se déroule dans les moteurs thermiques. Une fois encore, l'accroissement de la population au cours du 20^e siècle a été la cause d'une croissance inouïe des émissions d'oxydes azote dans l'environnement. Entre 1950 et 1995, le flux d'azote actif a plus que doublé ... et la moitié de ce surplus est d'origine urbaine. Dans les années 1990, l'apport dans l'environnement agricole d'azote actif dû à la contribution des engrais synthétiques se montait à 80 Mt par an, à comparer aux 30 Mt apportés par les légumineuses ... tandis que le brûlage des combustibles fossiles atteignait 20 Mt par an. Autrement dit, dans les régions d'agriculture intensive, l'apport humain l'emporte actuellement très largement sur les apports naturels ce qui, bien évidemment, ne peut qu'engendrer un déséquilibre inquiétant dans le cycle de cet élément. En bout de chaîne,

dans les sols, certains microorganismes réduisent les nitrates non absorbés par les plantes pour les amener, soit à l'état de N_2O , gaz à effet de serre, en outre susceptible de diffuser vers la stratosphère où il se révèle dangereux pour l'ozone (v. chapitre V), soit à l'état de NO_2 , un des gaz actifs dans la formation du « smog » photochimique. Le schéma ci-dessous résume le cycle de l'azote via la synthèse de l'ammoniac avec ses répercussions sur l'environnement et sur les dépenses d'énergie nécessaires à sa synthèse. Il faut aussi signaler que, à l'échelle mondiale, 50 % de la production d'hydrogène y est consacrée.

En fin de compte, dans quelle mesure une telle productivité agricole se répercute-t-elle sur le plan alimentaire ? Le tableau ci-dessous dresse le bilan de l'apport calorique journalier moyen dans différentes régions du monde (année 1995). Au repos absolu, le métabolisme de base d'un individu mâle de 70 kg exige 7.200 kJ par jour : Un travail léger en exige presque le double.

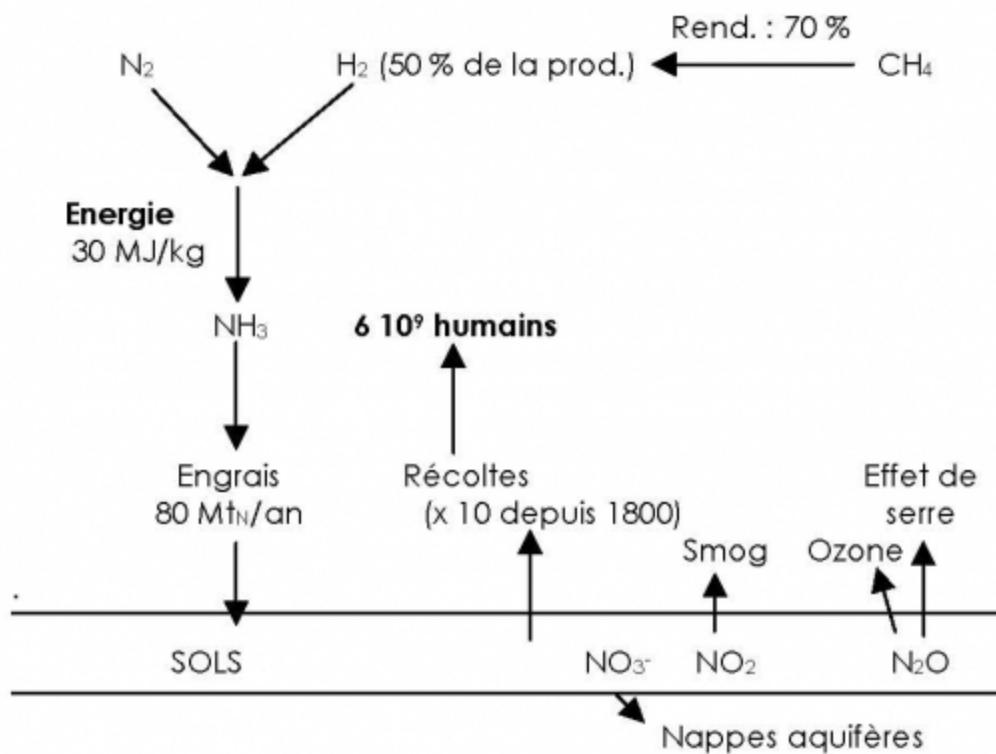


Tableau I.1. Bilan de l'apport calorique moyen dans quelques régions du monde

Région du monde	Apport calorique (kJ/jour)
Amérique du nord	14.500
Europe et Asie centrale	13.200
Amérique latine et Asie occidentale	11.700
Asie et Pacifique	10.800
Afrique	10.200
Monde	11.400

15. Conclusions

L'avalanche de chiffres auxquels nous venons d'être confrontés ne fait que traduire l'évolution exponentielle du développement humain. Développement de la population, bien sûr, soutenu par une productivité exceptionnelle des terres cultivées, appuyé par un progrès technologique qui a procuré à une minorité de la population du globe une qualité de vie inédite. Mais en contrepartie se développent des effets pernicieux, inévitables en l'état actuel des choses : une croissance exponentielle de la concentration dans l'air de gaz tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (diazote monoxyde : N₂O), l'ozone troposphérique (O₃). Cette croissance manifeste une perturbation grave de l'environnement atmosphérique. L'air n'est pas la seule victime de notre expansion puisque la superficie des sols fertiles (ou fertilisables) se réduit à un rythme inquiétant, de même que les forêts, les glaciers continentaux, sans citer la réduction de la biodiversité, l'épuisement des mers et bien d'autres critères liés à ce que l'on peut souhaiter d'un monde « viable ». En ce début de 21^e siècle, Malthus aurait beau jeu de reprendre les admonestations qu'il avait proférées en 1798 : il rencontrerait aujourd'hui moins de contradicteurs qu'alors.

16. Une brève histoire des machines thermiques et électriques

1712. Thomas NEWCOMEN (1663–1729), en association avec Thomas SAVERY, met au point une machine à vapeur utilisable, mais fort peu économique (condensation de la vapeur dans le cylindre refroidi par injection d'eau).

1769. James WATT (1736–1819) fait breveter une machine à vapeur nettement améliorée par comparaison avec celle de Newcomen : la condensation de la vapeur s'effectue en effet dans une enceinte distincte du cylindre. Il construit par après une machine dans laquelle la vapeur agit sur les deux faces du piston. Diverses améliorations sont encore apportées jusqu'en 1800, date à laquelle Watt se retire des affaires.

1802. Richard TREVITHICK (1771–1833) fait breveter une machine à vapeur fonctionnant sous haute pression et, dès 1803, il fait rouler la première locomotive digne de ce nom.

1816. Robert STIRLING (1790–1878), un pasteur écossais effrayé par le nombre des victimes causées par l'explosion de chaudières de machines à pression, dépose un brevet pour un moteur à combustion externe fonctionnant suivant un cycle thermodynamique particulier. De grandes difficultés provoquées par la synchronisation des deux pistons de ce moteur retardent sa réalisation jusque 1844. On a remis ce moteur à l'honneur durant les années 1970.

1832. Benoît FOURNEYRON (1802–1867) prend un brevet pour une turbine hydraulique qui sera employée dans l'industrie. Après de nombreuses mises au point, ses machines atteignent des rendements de l'ordre de 80 %.

1839. William GROVE découvre le principe de la pile à combustible.

1839. Antoine-Edmond BECQUEREL découvre l'effet photovoltaïque. La première cellule n'est construite qu'en 1914.

1859. Etienne LENOIR (1822–1900) construit le premier moteur à explosion fonctionnant au gaz.

1859. Gaston PLANTÉ (1854–1889) met au point la batterie au plomb.

1862. Alphonse BEAU de ROCHAS (1815–1893) imagine le cycle du moteur à quatre temps en insistant sur l'avantage d'une compression des gaz préalable à l'ignition. Ce brevet va déboucher sur la mise au point des moteurs à combustion interne (moteur à allumage commandé et moteur à allumage par compression).

1867. Nikolaus OTTO (1832–1891) construit un moteur fonctionnant suivant le principe de Beau de Rochas.

1871. Zénobe GRAMME (1826–1901) présente la première dynamo à l'Académie des sciences.

1879. Werner SIEMENS (1816–1892) fait rouler la première locomotive électrique, à laquelle succède bientôt le premier tramway.

Durant les années 1880, Lester PELTON (1829–1908) met au point une turbine hydraulique utilisée pour les chutes d'eau de grande hauteur mais de faible débit.

1886. Gottlieb DAIMLER (1834–1900) construit la première voiture automobile actionnée par un moteur à essence.

1887. Nikola TESLA (1856–1943) réalise le premier moteur asynchrone à champ tournant.

1889. Charles PARSONS (1854–1931) développe une turbine à vapeur qui tourne à 18.000 tours par minute. Cette turbine connaîtra bien vite un énorme succès, entre autre pour la propulsion des navires.

1891. George WESTINGHOUSE (1846–1914) distribue de l'hydroélectricité sous forme de courant alternatif.

1897. Rudolf DIESEL (1858–1913), dans l'espoir de réaliser un moteur à haut rendement qui puisse détrôner la machine à vapeur, construit le premier modèle d'un moteur qu'il peut alimenter avec les combustibles les plus divers.

1913. Henry FORD (1863–1947) initie la production en chaîne de la voiture automobile et prône la standardisation des pièces détachées.

1926. Robert GODDARD (1882–1945) lance la première fusée à propergol liquide.

1930. Frank WHITTLE (1907–1996) met au point le premier turboréacteur.

1942. Enrico FERMI (1901–1954) assemble le premier réacteur nucléaire fonctionnant à l'uranium naturel et modéré par du graphite.

1950. La consommation des dérivés du pétrole l'emporte sur celle du charbon aux Etats-Unis.

1954. Lancement du premier sous-marin propulsé à l'énergie nucléaire (le Nautilus).

1954. Fabrication des premières cellules photovoltaïques au silicium par les Américains Chapin, Fuller et Pearson.

1957. Première production commerciale d'électricité d'origine nucléaire.

1973. Embargo des pays arabes sur les exportations de pétrole vers les USA : quadruplement des prix du brut entre octobre 1973 et mars 1974.

1986. L'accident de réacteur nucléaire à Tchernobyl marque le début du coup de frein le plus rude au développement de l'énergie nucléaire.

17. Ouvrages consultés

European Commission : « Eurostat : Environment statistics Pocketbook », Luxembourg (2001).

Larousse « Inventeurs et Scientifiques – Dictionnaire de biographies » éd. Larousse, Paris (1994).

Le Goff, J. : « La Civilisation de l'Occident Médiéval », Champs – Flammarion (1997).

Lerner, R.E., S. Meacham & E.McNall Burns : « Western Civilisations – their History and their Culture », 12th ed., Vol. 2, W.W. Norton, New York, London (1993).

Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) : « L'avenir de l'environnement mondial », GEO 2000, De Boeck et Larcier (2000).

Rousseau, P. : « Histoire de la Science » 7^eéd., Les grandes études historiques ; Arthème Fayard, Paris (1945).

Smil, V. : « Cycles of life – Civilisation and the Biosphere », Scientific American Library, Freeman (1996).