



**HAL**  
open science

## La recherche scientifique en Low-Tech : définition, réflexions sur les pistes possibles, et illustration avec un projet de métallurgie solaire.

Julian Carrey, Sébastien Lachaize

### ► To cite this version:

Julian Carrey, Sébastien Lachaize. La recherche scientifique en Low-Tech : définition, réflexions sur les pistes possibles, et illustration avec un projet de métallurgie solaire.. La pensée écologique, 2020, N° 5 (1), pp.7-7. 10.3917/lpe.005.0007 . hal-04638490

**HAL Id: hal-04638490**

**<https://hal.science/hal-04638490v1>**

Submitted on 2 Jan 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **La recherche scientifique en low-tech : définition, réflexions sur les pistes possibles, et illustration avec un projet de métallurgie solaire.**

J. Carrey<sup>1,2</sup>, S. Lachaize<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-objets (LPCNO), 135, av. de Ranguel, Toulouse

<sup>2</sup>Atelier d'Ecologie Politique (Atécopol), Toulouse

Résumé en français (500-800 signes) : Nous définissons une technologie low-tech comme étant la brique élémentaire d'un système technique pérenne. Une analyse du système technique dans sa globalité est ainsi nécessaire pour définir la frontière high-tech / low-tech. Nous proposons une série de réflexions ou pistes de recherche dans les domaines de la mobilité, de la production d'énergie, de la santé, de la potabilisation de l'eau, de la conservation des aliments et de la pérennité des systèmes techniques. Nous justifions notre projet de métallurgie solaire à partir d'une analyse énergétique de la révolution industrielle anglaise. Enfin, ses aspects techniques sont développés : il consiste à activer la réduction de minerais riches en oxyde de fer par des réducteurs décarbonés ou bio-sourcés grâce à l'énergie solaire concentrée.

Titre en anglais : Low-tech scientific research : definition, thoughts on possible pathways, and illustration with a solar metallurgy project.

Résumé en anglais (600-1000 signes) : We define a low-tech technology as a building block of a sustainable technical system. An analysis of the technical system as a whole is therefore necessary to define the border between high-tech and low-tech. We provide thoughts or research guidelines in the fields of mobility, energy production, health, drinking water, food conservation and sustainability of technical systems. Our solar metallurgy project emerges from an energy analysis of the English industrial revolution. Finally, its technical aspects are developed: it consists in activating the reduction of iron-oxide rich ores by carbon-free or bio-sourced reducers thanks to concentrated solar energy.

Mots-clefs en français : low-tech ; système technique pérenne ; énergie solaire ; métallurgie

Mots-clefs en anglais : low-tech ; sustainable technical system ; solar energy; steel-making

Plan de l'article :

1. Notre définition du low-tech
2. Les différentes pistes envisagées
3. La métallurgie solaire.
  - a) Idée émergeant de l'analyse de la révolution industrielle.
  - b) La métallurgie classique
  - c) La métallurgie solaire

#### 4. Description méthodologique de notre projet

##### Notes bibliographiques sur les auteurs :

Sébastien Lachaize est chimiste et a principalement travaillé à la synthèse de nanoparticules magnétiques, en particulier pour des applications en oncologie. Depuis quelques années, il a arrêté de participer à cette recherche pour des raisons éthiques. Il se consacre, dans son quotidien et son travail, à l'exploration des façons de favoriser la Vie et sa diversité dans notre société. Julian Carrey est physicien et travaille dans le domaine du magnétisme. A côté de ses activités de recherche high-tech standard, il s'intéresse à l'histoire des techniques et des civilisations, à l'énergie, aux rapports du GIEC et aux low-techs. Tous deux sont enseignants-chercheurs à l'INSA Toulouse et, après plusieurs années de réflexion sur les low-techs, ont décidé de démarrer un projet concret.

---

La recherche scientifique dans les sciences dites « dures » est actuellement dans son immense majorité tournée vers la recherche d'innovations high-tech. Elle repose sur le postulat que l'humanité disposera à l'avenir, comme aujourd'hui, d'une énergie bon marché, croissante, et de ressources abondantes, permettant de développer et maintenir sur le long terme un système technologique complexe. La catastrophe écologique en cours remet ce postulat en question.

Nous, auteurs de cet article, sommes enseignants-chercheurs en chimie et en physique dans une école d'ingénieurs et sommes convaincus que, à moyen terme, notre système technologique high-tech et complexe ne pourra être maintenu. Nos réflexions rejoignent celles d'ingénieurs et scientifiques de plus en plus nombreux, et avons été inspirés et alimentés dans nos réflexions par les différents ouvrages de Philippe Bihouix (Bihouix, 2010 ; Bihouix, 2014), qui ont popularisé en France la notion de low-tech, et nous nous reconnaissons également dans l'approche de Kris De Decker, rédacteur du Low-Tech Magazine. En tant que chercheurs, nous souhaitons démarrer une activité de recherche scientifique en low-tech, mais cette envie s'est accompagnée de nombreux questionnements : qu'est-ce que le low-tech ? Quelles sont les règles d'une recherche en low-tech, si règles il y a ? Concrètement, sur quoi effectuer notre recherche ? Etc... Cet article présente donc nos réflexions sur ces différentes questions, ainsi que la manière dont nous avons mis ces réflexions en pratique.

### **Notre définition du low-tech**

Comment peut-on faire rigoureusement la distinction entre low-tech et high-tech ? Une définition communément utilisée est qu'une technologie est low-tech si elle utilise des matériaux *abondants*, qu'elle est *simple*, *facilement* réparable, *sobre* en énergie, et qu'elle génère *peu* de nuisances, pollution ou déchets. Cependant, ces éléments de définition ne permettent pas de différencier clairement la frontière entre low-tech et high-tech, car les notions d'abondance, de simplicité, de facilité, de sobriété, ainsi que les niveaux acceptables d'impacts environnementaux sont forcément relatifs et risquent de conduire à une catégorisation basée sur l'arbitraire ou l'intuition.

Nous proposons une définition alternative : *une technologie est low-tech si elle constitue une des briques élémentaires d'un système technique pérenne*. Nous considérons ainsi que tout système technique peut-être décomposé en un ensemble de briques élémentaires. Chaque brique représente une technique, et est caractérisée par ses entrées (matériaux, énergie, temps de travail, etc) et ses sorties (production, impacts environnementaux et sociaux, déchets, etc). Quelques briques élémentaires d'une société pré-industrielle donnée pourraient par exemple être : extraire de l'eau d'un puits, fabriquer des couteaux à partir du fer produit par un bas-fourneau, cultiver du blé à la houe en bois, chauffer un lieu d'habitation avec un brasero, transporter des marchandises avec des bœufs, boucher une carie dentaire avec du plomb, moudre du grain avec un moulin à vent, etc. Dans un système *pérenne*, le niveau de population et les technologies utilisées sont maintenus à peu près à l'identique pendant plusieurs millénaires. Egalement, l'énergie consommée et le

temps de travail nécessaires au maintien du système technique restent globalement stables. Si on fait l'hypothèse que la société dont nous venons de décrire quelques briques est pérenne (mais cela resterait à démontrer), nous pourrions en déduire que le puits, les couteaux en fer, les bœufs, la houe, le braséro, le plomb dentaire et le moulin à vent sont un ensemble cohérent de technologies low-tech.

Nous voyons bien que cette définition du low-tech la rend dépendante du système dans lequel on l'envisage et des autres technologies. On ne peut donc pas vraiment dire qu'une technologie donnée est low-tech, mais plutôt qu'un ensemble complémentaire de technologies, utilisées par une société donnée pour son fonctionnement, sont low-tech. Cette définition n'est pas forcément évidente à utiliser en pratique, mais elle a le mérite de reposer sur des critères objectifs et quantifiables, ce qui nous paraît indispensable pour une approche scientifique de la question. Ainsi, certaines caractéristiques que l'on attribue généralement aux low-techs deviennent une conséquence de cette définition de base : le côté « réparable », la « sobriété », et l'utilisation préférentielle en matériaux abondants sont en définitive des moyens permettant d'assurer la pérennité. Ainsi, au vu de notre définition des low-techs, une ressource est définie comme abondante si, pour un niveau de production constant, la quantité d'énergie, le temps de travail et la technique pour l'obtenir varient peu sur la durée de pérennité envisagée. Dans ces conditions, l'utilisation de cette ressource est compatible avec la pérennité recherchée.

Cette définition ouvre une problématique sur la « simplicité » supposée des technologies low-tech. Un futurologue « optimiste » considèrerait peut-être que la société numérique pourrait être maintenue pendant des millénaires, et que la recherche sur des ordinateurs très sobres, réparables, robustes, etc... serait ainsi une recherche low-tech (alors qu'un ordinateur est très loin d'être une technologie simple). Un futurologue « pessimiste » pourrait considérer qu'il n'est même pas sûr qu'un système technique pérenne contienne l'électricité (qui est née après la révolution industrielle) et que toute recherche impliquant des technologies fonctionnant à l'électricité n'est pas low-tech. Sans étude plus approfondie, la frontière entre high-tech et low-tech dépend donc de la vision à long-terme du futur technologique de l'humanité et est donc finalement laissée à la libre appréciation et l'intuition de chacun, le plus difficile dans cet exercice étant de ne préjuger de rien ! Une délimitation plus objective de la frontière entre low-tech et high-tech implique d'avoir une vision plus claire de la nature de différents systèmes techniques pour différentes sociétés pérennes : pour chacun de ces systèmes, ce sera le critère de pérennité qui tranchera entre ce qui est et ce qui n'est pas low-tech en son sein. Nous y reviendrons.

Une autre question est celle de l'utilisation d'outils high-tech dans la recherche low-tech. Au démarrage de ce projet, nous avons débattu pour savoir si un projet de recherche en low-tech pouvait utiliser des outils résolument high-tech (ordinateurs, capteurs électroniques, logiciels de simulations, gros équipements de laboratoire, etc...) ou pas. Nous considérons que, *à terme*, la finalité d'un projet de recherche low-tech est de faire en sorte que l'ensemble du matériel utilisé pour la fabrication d'une machine et/ou le contrôle d'un procédé soit low-tech. Si un procédé chimique low-tech nécessite à un moment donné de connaître le pH d'une solution, il faudra que les

scientifiques, à terme, traitent de la question de la mesure low-tech du pH. Néanmoins, deux arguments nous ont convaincu que, *au cours du processus de recherche proprement dit*, les outils high-tech pouvaient être utilisés: i) de la recherche low-tech avec des outils low-tech sera probablement faite, par nécessité, pendant les millénaires qui viendront ; les outils high-techs dont nous disposons actuellement permettent de mettre au point des procédés et de les comprendre d'une manière qui ne serait pas possible sans ; nous espérons que les résultats obtenus aujourd'hui à l'aide d'outils high-tech pourront être utiles, même si les outils utilisés pour les obtenir viennent à disparaître ; ii) compte tenu de l'urgence de la situation actuelle, et de l'incertitude sur ce que sera notre futur dans les prochains siècles ou les prochaines décennies, nous souhaitons effectuer des recherches en low-tech accélérées grâce à nos moyens high-tech.

Nous sommes néanmoins bien conscients que l'utilisation de produits high-tech dans une recherche low-tech est une question complexe, car *la high-tech fait partie des causes des problèmes auxquels nous devons désormais faire face*. Savoir si un fort degré de high-tech (utilisation de supercalculateurs, par exemple) est acceptable ou non dans un projet low-tech doit donc être laissé à la libre appréciation de chacun. En ce qui nous concerne, même s'il ne s'agit pas directement du sujet, nous avons par exemple décidé de ne pas postuler à un appel à projets permettant d'obtenir des bourses de thèse destinées à des étudiants habitant sur un autre continent, et qui auraient donc très vraisemblablement utilisé le transport aérien au cours de leur doctorat. Il nous semble qu'un certain degré de sobriété, au cours même du processus de recherche, fait partie intégrante de la recherche en low-tech, même si la limite dans ce cas-là – comme dans beaucoup de situations de la vie quotidienne – ne peut être que complexe à déterminer.

### **Les différentes pistes envisagées**

Nous considérons que la recherche scientifique en low-tech doit en priorité concerner les techniques permettant d'assouvir nos besoins essentiels à la vie : boire, s'alimenter et s'abriter. Cependant, selon la société pérenne établie, il est possible d'étendre cette liste à d'autres actions qui deviendrait « essentielles » à son maintien. Nous y rajoutons ainsi un autre élément qui nous paraît potentiellement essentiel et indissociable des autres : transmettre les savoir-faire et connaissances nécessaires à la pérennité de la société. En effet, si une société utilise une technique donnée pour répondre à l'un de ses besoins fondamentaux (pièges à poisson en osier, maison en terre crue, réseau de voies ferrées ou de télécommunication, etc), alors perdre le savoir-faire lié à cette technique met la société en péril. Le low-tech, avec notre définition liée à la pérennité, ne peut donc s'affranchir d'une réflexion sur les techniques de transmission des connaissances et sur leur pérennité. A cet élément pourrait aussi s'ajouter la nécessité de déplacer et se déplacer, s'éclairer, se soigner...

Au sein de ces différents domaines, certaines techniques ont déjà été largement explorées par les anciens, et présentent des marges de « progrès » incertaines, voire probablement nulles. Par exemple, il est peu probable que toutes les connaissances que nous avons accumulées depuis 300 ans puissent aujourd'hui permettre d'améliorer de manière significative un moulin à eau en bois ou une

charrue. Evidemment, ce constat n'enlève rien à l'intérêt de raviver les savoir-faire sur ces techniques essentielles.

Nous souhaitons par contre discuter de certaines thématiques qui nous ont paru intéressantes pour une recherche scientifique low-tech, certaines faisant partie de nos domaines initiaux de compétences (physique et chimie), d'autre non.

► Potabilisation de l'eau : dans des sociétés avec une forte densité de population, purifier l'eau peut s'avérer nécessaire pour éviter certaines maladies. Les techniques actuelles de purification sont chimiques (pastilles chlorées) ou physique (micro-filtration, ultra-violet). Des pistes low-tech envisageables pourraient être basées sur la distillation solaire, la production du chlore (qui nécessiterait à priori de l'électricité pour l'électrolyse de solutions salines) ou la fabrication de céramiques ou membranes de filtration.

► Réfrigération solaire : les techniques de conservation des aliments utilisées par les anciens sont nombreuses et très variées : salaison, fumage, lacto-fermentation, pain de glace (dans les régions adaptées). Elles pourraient convenir à de nombreuses sociétés. Le stockage à long terme par le froid peut néanmoins s'avérer être utile et complémentaire des autres. Une réfrigération solaire low-tech pourrait être basée sur des cycles d'adsorption/désorption de couples charbon/éthanol, silice/eau ou basé sur la détente d'ammoniac liquide.

► Méthaniseurs low-tech : plusieurs techniques modernes de production d'énergie sont connues depuis des temps très anciens (hydraulique, éolien), alors que d'autres n'ont pu émerger qu'à la suite de l'utilisation massive des énergies fossiles (photovoltaïque, nucléaire). Notre intuition est que ces dernières pourraient difficilement faire partie d'un système technique pérenne, même si cela reste à démontrer. Une exception selon nous est la méthanisation, qui n'était pas connue des anciens, et pourrait potentiellement avoir une mise en application low-tech, bien que nous ayons des doutes sur le rendement « énergie produite / temps de travail » d'une version low-tech de cette technologie. Mais avoir des doutes n'est pas une raison suffisante pour ne pas se pencher sur le sujet, au contraire !

► Transmission des connaissances : pérenniser un système technique global sur un ou plusieurs millénaires rend selon nous l'effort de transmission des connaissances et savoir-faire indispensable. Parmi les moyens actuellement à notre disposition, le livre apparaît comme une brique élémentaire potentielle. Son utilité se pose cependant pour une brique élémentaire nécessitant une maintenance ou une reconstruction périodique à une échelle de temps plus courte qu'une vie : dans ce cas, la transmission orale pourrait suffire. Ainsi, une brique élémentaire durable pourrait imposer un moyen de transmission plus complexe. Le travail de recherche sur le livre ne semble plus nécessaire, mais il nous semblait suffisamment conditionner la pérennité de l'ensemble pour que nous les mentionnions. De plus, les éventuels aléas qui risqueraient de compromettre ou détruire le travail de transmission orale (épidémie, catastrophe naturelle) pousse à mettre en place, de toute façon, des moyens de stockage pérennes des savoir-faire.

► Eclairage électrique : historiquement, la première utilisation de l'électricité fût pour l'éclairage des habitats. L'utilisation de l'électricité dans un système

technique pérenne nécessite le développement et la mise en place d'un ensemble de techniques à étudier : générateur d'électricité (éolien / hydraulique), stockage, éventuelle mise en réseau, ampoule, etc.

► Mobilité/transport : Les aléas de la production alimentaire, qui ont historiquement conduit à des famines, ne peuvent être compensés que par du transport régional de denrées. Ceci n'a été possible de manière efficace qu'après la révolution industrielle, et pose la question cruciale d'un transport de marchandises à l'échelle régionale dans un système technique pérenne. Nous imaginons, pour l'instant, un système de rails sur lequel des véhicules se mouvraient à la force humaine, voire éolienne: les draisines. Des systèmes encore plus simples, comme la brouette chinoise et son réseau de chemin de terre, peuvent aussi être envisagés. Bien sûr, la possibilité d'avoir des systèmes électriques plus complexes est également à étudier.

► Médecine : Il apparaît clair que la médecine et la chirurgie nécessiteraient une recherche low-tech passionnante. En effet, l'essentiel des connaissances scientifiques ayant permis le développement de la médecine moderne, et son espérance de vie associée, ont eu lieu après la révolution industrielle. Alors, si l'on peut d'ores et déjà bien imaginer à quoi pourrait ressembler une agriculture low-tech, la médecine low-tech reste une question ouverte, et bien entendu très dépendante du système technique global dans lequel elle s'inscrit. La recherche en médecine low-tech nécessiterait des travaux combinés en biologie, chimie (pour la fabrication d'éventuels produits chimiques essentiels) et physique (pour la fabrication d'instruments). Il nous apparaît que le développement d'anesthésiants pour la chirurgie et d'antiseptiques devrait être prioritaires. Il nous semble par contre illusoire d'imaginer développer un système de soin aussi performant que celui que nous avons actuellement, et il nous faut probablement accepter qu'un système technique pérenne ne procurerait pas la même espérance de vie que notre système technique actuel. Ceci pourrait par contre être compensé par une qualité de vie bien meilleure, car le contrepoint bien documenté de la complexité et l'efficacité de notre système socio-technique actuel est une perte de la qualité de la vie sociale.

► Enfin, un point crucial de notre approche est le suivant : comment peut-on savoir si un système technique donné est pérenne ou pas ? Et ainsi qualifier ses briques élémentaires de « low-tech » ou « high-tech ». Cela ne peut évidemment pas être fait par une approche expérimentale. Une approche historique permet d'étudier et de discuter de la pérennité de systèmes techniques ayant existé par le passé, et certains scientifiques travaillent explicitement sur ces questions, en étudiant des phénomènes tels que la déforestation, l'érosion des sols, les quantités de minerais consommés, l'épuisement des mines, etc, dans des sociétés du passé. Mais on se retrouve démunis dans le cas où l'on souhaiterait étudier la pérennité d'un système technique issu de notre imagination, en particulier si ce dernier comprend des briques élémentaires n'ayant jamais été incluses historiquement dans un système technique. Certes, des évaluations grossières de la pérennité de différents systèmes techniques pourraient être menées par un groupe pluridisciplinaire de chercheurs travaillant avec des outils simples. Néanmoins, nous ne voyons pas d'autres solutions que l'utilisation de simulations informatiques pour évaluer la pérennité d'un panel



exhaustif de systèmes techniques complexes. Dans le stimulant livre « Sustainability or collapse », les chercheur.es participant au projet IHOPE, qui réunit à la fois des historien.nes et des modélisateur.rices ayant pour objectif d'étudier la pérennité de sociétés, présentent un état de lieux de leurs réflexions à ce sujet (Costanza, 2005). De nombreux logiciels, généralement plutôt adaptés à la simulation de toute notre planète qu'à des systèmes de petite taille, existent. Pour notre part, nous avons imaginé qu'une possibilité de traiter cette question serait le développement d'une simulation numérique permettant de simuler un système socio-technique dans un écosystème donné, et de chercher les conditions de la pérennité de ce dernier. Le développement de ces simulations nécessiterait un travail conséquent et multidisciplinaire de description des différents éléments (les briques élémentaires) du système technique et de leurs interactions avec leur environnement. Bien entendu, une grande diversité de systèmes techniques pérennes serait possible, en fonction de paramètres cruciaux comme la densité de population, le temps de travail, le confort souhaité et la durée de vie espérée. La détermination de ce panorama de systèmes socio-techniques pérennes aurait pour objectif d'alimenter un débat serein, objectif et argumenté sur les futurs possibles de l'humanité. Les détails sur ce projet, auxquels nous avons beaucoup réfléchi sans le mettre en œuvre, peuvent être obtenus sur simple demande auprès des auteurs. Nous sommes là en présence d'une recherche dont les outils seraient très high-tech (nécessitant des moyens numériques importants), et auraient pour autant comme objectif de répondre à une question que nous considérons comme centrale pour les low-techs. Cela nous ramène à une question d'éthique déjà évoquée plus haut.

### **Pourquoi une recherche sur la métallurgie solaire ?**

#### *Un projet émergent de l'analyse de la révolution industrielle*

La photosynthèse régit la production de bois, ainsi que la production de nourriture pour les humains comme pour les animaux. Le bois étant utilisé comme source d'énergie thermique et les animaux comme source d'énergie mécanique en complément du travail humain, la « barrière de la photosynthèse » était une limite forte à la quantité d'énergie disponible dans les sociétés préindustrielles, et donc par la même à la complexité technologique accessible. Historiquement, les énergies hydraulique et éolienne, distinctes de la photosynthèse, ont également été utilisées pour fournir de l'énergie mécanique. Les analyses quantitatives qu'on retrouve dans plusieurs travaux d'historiens spécialistes de l'énergie indiquent néanmoins que la part d'énergie mécanique fournie par les moulins à eau et à vent restait finalement relativement faible, et en tout cas insuffisante pour induire une modification radicale du système technique telle que celle ayant eu lieu lors de la révolution industrielle (Kander et al., 2013). La production d'énergie mécanique par les moulins à vent et hydrauliques est en effet limitée par l'utilisation du bois qui, notamment, ne permet pas de fabriquer des turbines ou des roues hydrauliques de grande puissance, ces dernières nécessitant l'emploi de métal.

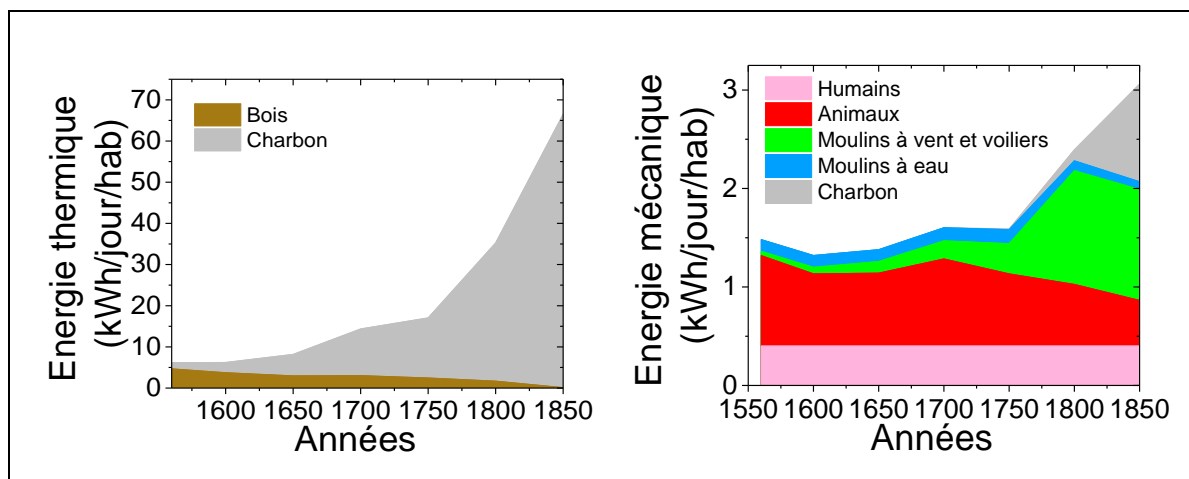


Figure 1 : (a) Evolution de l'origine de l'énergie thermique en Angleterre. (b) Evolution de l'origine de l'énergie mécanique en Angleterre. Dans les légendes, les catégories situées en-dessous de la pile sont listées en premier. Les données brutes de consommation de charbon sont basées sur les estimations d' E.A. Wrigley (Wrigley, 2010). La séparation entre énergie thermique et énergie mécanique pour le charbon a été fait en se basant sur le rendement des machines à vapeur et la part du charbon utilisée pour ces dernières. Plus de détails sur la méthodologie peuvent être obtenus sur demande auprès des auteurs.

L'analyse menée par S. Benoit de la révolution industrielle en France montre que l'énergie hydraulique a été un ingrédient majeur de l'industrialisation de la France, bien avant que la machine à vapeur ne prenne le relais (Benoit, 2006). Pour ne donner qu'un exemple parmi de nombreux disponibles, dès 1837, l'ingénieur français Fourneyron installait en Allemagne une roue hydraulique délivrant une puissance de 47 kW, alors que les moulins à eau traditionnels ne délivrent qu'une puissance de 2 kW. Une analyse que nous avons réalisée de l'évolution de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique lors de la révolution industrielle anglaise est également instructive (voir Figure 1): elle illustre que la révolution industrielle anglaise est avant tout, et de manière très nette, une *révolution thermique* : l'utilisation de « charbon de terre » (issu du sous-sol) en lieu et place du charbon de bois a permis une augmentation considérable de la production de fonte et d'acier, l'augmentation de la puissance mécanique due à la dissémination de machines à vapeur ne venant que bien plus tard. Si, par une expérience de pensée, nous imaginions vouloir développer un système technique qui aurait une production énergétique plus importante que celles des sociétés préindustrielles (qui était de l'ordre de 10-20 kWh/jour/hab), mais sans utiliser de charbon, nous utiliserions sans doute de manière privilégiée les roues hydrauliques et les turbines pour cela : la régularité de leur production d'énergie, la relative facilité de leur construction et les fortes puissances accessibles en font des machines de premier choix. Si nous suivions plus ou moins le chemin pris lors de la révolution industrielle pour cela, il nous faudrait en premier lieu une technologie permettant de produire une quantité de métal supérieure à celle produite dans la période préindustrielle, mais s'affranchissant de la « barrière de la photosynthèse ». C'est ici qu'intervient notre projet de métallurgie solaire. Nous considérons qu'il s'agit d'une brique essentielle d'une certaine famille de systèmes techniques pérennes : ceux produisant plus de

métal et d'énergie que dans les civilisations préindustrielles métallurgiques, ou bien en produisant autant ou moins mais sans utiliser de bois.

Que l'on ne s'y trompe pas : nous ne disons pas que produire plus d'énergie et de métal est mieux ou moins bien que de ne pas en produire. Par exemple, la question des famines dans une société peut être réglée de nombreuses manières différentes, et pas seulement par la construction de rails en fontes, de machines hydrauliques et de charrues. Et elle peut très bien ne pas être résolue du tout malgré ces machines, si les structures sociales ne permettent pas de répartir les denrées ou si les densités de population sont trop importantes. En cela, nous considérons que les structures sociales associées à un système technique sont primordiales, même si la réflexion sur ces dernières n'apparaît pas dans cet article. Dans ce projet, en nous focalisant sur un point technique particulier, nous cherchons juste à savoir si toute une famille de systèmes techniques est potentiellement pérenne ou non, ce qui nécessite d'étudier une technologie qui, historiquement, n'a pas été utilisée pour la production de métal. En ce sens, nous considérons qu'il s'agit d'un véritable projet de recherche low-tech.

### *La métallurgie classique*

Les plus anciens vestiges de bas-fourneau datent du début du 1<sup>er</sup> millénaire avant J.-C., mais les scientifiques estiment que l'obtention de fer métallique à partir de son oxyde a débuté entre le 3<sup>ème</sup> et le 2<sup>ème</sup> millénaire avant J.-C. Dans un bas-fourneau, minerai et charbon de bois sont disposés en couches alternées. Après plusieurs heures de chauffe puis refroidissement, on obtient une « loupe » de métal qui est battue pour en éliminer les impuretés, les « scories », issues du minerai initial. Le rendement de ce procédé a par la suite augmenté, mais le principe n'a que peu évolué jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle. A partir du XV<sup>ème</sup> siècle mais surtout au-delà du XVIII<sup>ème</sup> siècle se développent les haut-fourneaux qui modifient le procédé en atteignant des températures encore plus élevées (1600°C contre 1100°C en moyenne pour un bas-fourneau). Ces derniers délivrent de la fonte liquide, de formule chimique générale Fe<sub>3</sub>C. La fonte peut ensuite être appauvrie en carbone pour former différents aciers, dont les propriétés physiques dépendent fortement de la teneur finale en carbone. Aujourd'hui, le niveau de maturité technologique des hauts-fourneaux permet d'être très proche de l'optimum théorique en termes d'efficacité énergétique. De même, leur taille a atteint un optimum économique avec une capacité autour de 3 Mt/an par unité de production. En 2017, la production mondiale d'acier était de 1,7 milliards de tonnes.



Dans cette transformation, le carbone du charbon de bois (et à partir du milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle du coke, formé à partir de charbon de terre) est ici le réactif utilisé pour soustraire l'oxygène à l'oxyde de fer ; c'est un réducteur. Cette réaction chimique d'oxydo-réduction s'effectue à très haute température (au-delà de 800°C), et produit du fer et du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (voir équation ci-dessus). Le charbon joue ici le double rôle de réducteur et de source de chaleur grâce à sa combustion. Ces deux

principales contributions conduisent en moyenne à 1,8 tonne de gaz à effet de serre émis par tonne d'acier produite (Yellishetty, 2010).

### *La métallurgie solaire*

Notre projet de métallurgie solaire vise à utiliser l'énergie solaire concentrée comme source de chaleur mais vise également à utiliser d'autres réducteurs non carbonés ou bio-sourcés, afin de nous affranchir totalement du charbon, qu'il soit issu du sous-sol ou du bois, pour le procédé. Notre justification en est la suivante : si le charbon de terre est utilisé pour la métallurgie, elle ne serait alors pas pérenne sur le très long terme, même si elle le serait sur le moyen terme ; si du charbon de bois est utilisé, nous serions limités par la production de bois des forêts (et donc la barrière de la photosynthèse), comme dans les sociétés pré-industrielles.

Ce travail constitue un véritable travail de recherche, dans le sens où, historiquement, cette technologie n'a jamais existé. Nous considérons qu'il est low-tech, dans la mesure où la métallurgie est une brique essentielle pour fabriquer des outils en fer, nécessaires dans un très grand nombre de systèmes techniques pérennes que l'on pourrait imaginer. Notre intuition est que la présence de la métallurgie dans ces systèmes est crédible, voire certaine, en raison de l'abondance du fer dans la croûte terrestre et de sa relativement bonne répartition spatiale (voir Figure 2), permettant à des communautés régionales ou locales de développer une métallurgie sans avoir recours à du transport à très longue distance. Ce n'est par contre pas le cas du charbon, dont la répartition est bien plus inhomogène, nécessitant du transport à longue grande distance (voir Figure 2).



Figure 2: Distribution du fer (gauche), du charbon (milieu) et du cuivre (droite) en Europe (Source : European Geological Data Infrastructure).

Même si notre projet est centré sur le fer, la métallurgie solaire pourrait être utilisée pour d'autres métaux. Par exemple, le cuivre, élément essentiel de notre système électrique actuel, est également plutôt bien réparti, mais pose une problématique différente. Ainsi, si la production d'une relativement faible quantité de fer peut subvenir aux besoins en outils d'une société sobre en matériaux, il faut noter que la quantité de cuivre nécessaire pour un réseau électrique global est par contre importante. Néanmoins, l'avantage du cuivre est qu'il s'oxyde beaucoup moins que le fer. Nous voyons donc que l'éventuelle place et nature d'une brique « production électrique » dans un éventuel système technique pérenne pose des questions complexes et passionnantes.

Utiliser l'énergie solaire directe pour un procédé pose des problématiques spécifiques, la première étant la taille des exploitations. Ainsi, dans le domaine de la production d'électricité, pour remplacer un petit réacteur nucléaire de 900 MW, il faut une centrale solaire thermodynamique de 40 km<sup>2</sup>. Dans un autre domaine, un bon four à pizza professionnel électrique d'environ 1 m x 1 m nécessite une puissance de 26 kW. Même dans les conditions les plus favorables (vers midi en été), le remplacer par un réflecteur solaire nécessiterait de collecter l'énergie solaire sur une zone de 5 m x 5 m, sans compter qu'une partie de l'énergie est perdue lors de la collecte. De plus, le souhait compréhensible d'avoir un four qui fonctionne au printemps ou en automne devrait conduire à utiliser un réflecteur avec une surface deux fois plus importante.

La deuxième problématique, bien connue, est celle de l'intermittence que l'on peut soit tenter de pallier techniquement (stockage de l'énergie thermique), soit intégrer comme contrainte, avec comme conséquences qu'il y a des jours sans électricité, pizza, ou production de fer.

### **Description méthodologique de notre projet**

Pour ce projet, nous avons décidé d'utiliser comme matériaux de base des minerais qui ont été historiquement exploités dans le Sud-Ouest de la France pour la production métallurgique. Nous obtenons ces minerais via une collaboration avec des géologues (GET, Toulouse) ayant effectué des prélèvements sur différents sites d'intérêt. Pour l'instant, nos expériences consistent à réduire des minerais dans un simulateur solaire. Une fois mis au point, ces procédés seront testés en condition réelle au four solaire d'Odeillo (collaboration PROMES, Odeillo), lieu d'expérimentation de différentes utilisations de l'énergie solaire depuis 1969. Sa plus grande installation est un miroir parabolique de 1830 m<sup>2</sup>, vers lequel des héliostats (grands miroirs orientables) renvoient la lumière solaire. Il permet de concentrer une énergie d'1 MW. Pour les premières expériences de mise au point, de plus petits concentrateurs, d'une puissance d'environ 1,5 kW, sont utilisés.

Nous avons choisi d'étudier plusieurs types de réducteurs décarbonés (hydrogène, ammoniac) et/ou bio-sourcés (urée, méthane). Chacun de ces réducteurs, dans un système technique pérenne, pourrait être produit par différentes techniques, qui devraient faire l'objet d'études spécifiques, mais ne font pas partie pour l'instant de notre projet. Ainsi, l'hydrogène pourrait être produit par une technique d'électrolyse de l'eau (une version low-tech pourrait être de l'électrolyse directement réalisée à proximité d'une roue hydraulique) ou par des procédés solaires à haute température, actuellement étudiés à Odeillo. L'ammoniac et l'urée seraient tous deux issus de l'urine produite par des humains et des animaux. Cela nécessite aussi une recherche sur les procédés permettant l'extraction et la conservation de l'urée et de l'ammoniac depuis l'urine. Le méthane pourrait être issu de la méthanisation de résidus de culture. On peut noter que les réducteurs bio-sourcés ne permettent pas de franchir la « barrière de la photosynthèse », évoquée plus haut. Néanmoins, ils permettent d'avoir des réducteurs qui ne proviennent pas des forêts, et pourraient conduire à une augmentation de la quantité totale de réducteur

disponible dans un système technique pérenne. Cette augmentation serait par contre en compétition avec d'autres usages potentiels de l'urine comme le tannage du cuir ou l'enrichissement en azote des sols cultivés, par exemple. Cela illustre bien la nécessité d'avoir une vision globale d'un système technique lorsque l'on réfléchit aux technologies « low-tech », afin de ne pas résoudre un problème en en créant un nouveau, un travers de nos sociétés que nous souhaiterions éviter. Cela rejoint la question du niveau de consommation de fer et de l'usage qui en est fait dans la société, car il nous paraît assez clair que le niveau de production en fer d'une société faisant appel à des réducteurs bio-sourcés ne pourrait être que bien inférieur à notre niveau de production actuel.

Enfin, un dernier volet de ce projet est basé sur une collaboration avec des spécialistes de l'analyse de cycle de vie des procédés (TBI, Toulouse), ce qui nous permettra d'évaluer les impacts environnementaux de cette technologie et de la comparer à celle basée sur l'utilisation du charbon fossile ou du charbon de bois. Il faut néanmoins noter qu'une analyse de cycle de vie effectuée avec les méthodologies actuelles conduit à évaluer les impacts d'une « brique élémentaire » dans notre système technique actuel, qui n'est a priori pas pérenne. Elle ne permet en revanche pas de savoir si cette technologie est « low-tech », dans le sens où nous l'entendons.

### **Conclusion**

Savoir si la métallurgie solaire serait préférable ou pas à l'utilisation de la métallurgie classique à base de charbon de bois nécessiterait une analyse complète et complexe des systèmes techniques permettant à des sociétés d'être pérennes. Intuitivement, nous dirions que, dans des systèmes techniques proches de celui des sociétés préindustrielles européennes, qui avaient des niveaux de production de fer relativement faibles, l'enjeu n'en vaudrait sans doute pas la chandelle, en raison de l'investissement technologique important et des inconvénients de l'intermittence ; l'utilisation de charbon de bois serait probablement plus avantageuse. Par contre, dans une société où la production serait plus importante que dans les sociétés préindustrielles et/ou le bois une denrée rare, cela ne serait sans doute plus le cas. Mais répondre rigoureusement à cette question nécessiterait d'évaluer précisément les temps de travail, les rendements, l'usure et la maintenance de ces différentes techniques, reprenant ainsi les méthodes de l'archéologie expérimentale, qui cherche à comprendre pourquoi certaines technologies ont été préférées à d'autres dans le passé. En ce sens, la recherche en low-tech pourrait, par certains aspects, être considérée comme une archéologie du futur !

### **REFERENCES :**

Benoit Serge. 2006. «La modernité de la tradition : les énergies renouvelables classiques – l'eau et le bois – dans la voie française de l'industrialisation ». Thèse de doctorat d'Histoire. Université d'Evry Val d'Essone.

Bihoux Philippe. 2014. L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable: Vers une civilisation techniquement soutenable. Le Seuil.

Bihouix Philippe, de Guillebon Benoît. 2010 ; Quel futur pour les métaux?: raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société. EDP sciences.

Costanza R., Graumlich L. J., Steffen W.. 2005. "Sustainability or collapse : an integrated history and future of people on Earth", Cambridge et Londres : MIT press.

Kander A., Malamina P., Warde P.. 2013. "Power to the people". Princeton et Oxford : Princeton University Press.

Wrigley E.A. 2010, « Energy and the English Industrial Revolution », Cambridge Cambridge : University Press.

Yellishetty M., Ranjitha P.G., Tharumarajah A. 2010. "Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable?“, Resources, Conservation and Recycling, 54, 1084–1094