

Hors-série de la revue Centraliens

Quels choix technologiques pour une société durable?



Ce numéro est un hors-série de la revue "Centraliens" éditée par
l'Association des Centraliens sise 8 rue Jean Goujon -75008 Paris.
Il comporte 58 pages couvertures incluses.
Imprimeur : ISI Print - Saint-Denis La Plaine.
Dépôt légal à parution : 2^{ème} trimestre 2016.
Directeur de la publication : Jean-Georges Malcor
Rédactrice en chef : Yolande Ricart
CPPAP n° 0713 G 83491 - N° ISSN 0004-3990 - Prix de vente : 15 € TTC.

Préface

Par leur histoire de grands architectes de la transformation industrielle de nos sociétés, les Centraliens se sont toujours trouvés au centre de choix mariant innovation technologique et construction sociétale. Dans un monde où la société est plus que jamais transformée par les technologies, cette mission prend une fois de plus tout son sens, à l'heure où apparaît la nécessité de construire une société durable.

Quels choix technologiques pour la construction d'une société durable ? Telle est la réflexion que nous souhaitons engager à travers la publication de ce hors-série.

De tels choix devront favoriser une consommation réduite ou nulle de ressources rares ou non recyclables (ne limitant pas l'utilisation généralisée des technologies choisies) ; rechercher non seulement efficacité mais aussi résilience ; être capable de prendre en compte l'évolution des technologies dans le temps long, une technologie pouvant s'avérer être le remède comme le mal.

Les innovations à mettre en œuvre dans un projet dépasseront ainsi toute mode « high tech » du moment qui n'aurait pas été réfléchie, pour privilégier l'articulation appropriée et raisonnée de tous les savoirs et savoir-faire technologiques accumulés, certains à la pointe du progrès comme d'autres à redécouvrir et à recombinaison de manière originale.

Il nous apparaît dès lors pertinent d'investiguer de tels axes, dans une approche plus transversale, responsable et citoyenne, prenant à la fois en compte le facteur humain, les modes d'organisation et les interactions sociales, et qui permettra à l'ingénieur de choisir les technologies les plus appropriées à la transformation de la société dans un mode « durable ».

Des exemples dans les lignes qui suivent donnent des ordres de grandeur techniques et montrent qu'une telle approche peut se développer dans la plupart des secteurs d'activités, souvent simplement en choisissant de s'y intéresser. A partir de telles bases, la volonté de dirigeants éclairés, l'aménagement de la réglementation, le maintien et l'amélioration des compétences de nos ingénieurs sur le sujet, et des initiatives entrepreneurs suffisent ensuite à rendre possible le meilleur !

Bonne lecture. Bonne réflexion. Bonne inspiration.

Jean-Georges Malcor
Président de l'Association des Centraliens

Editorial



Etienne Klein (*Ecole Centrale Paris 1981*) est physicien, directeur de recherches au CEA et docteur en philosophie des sciences. Il dirige le Laboratoire de Recherche sur les Sciences de la Matière du CEA (LARSIM) et enseigne la philosophie des sciences à l'Ecole Centrale de Paris.

© Philippe Matsas - Flammarion

Nous avons pris conscience de notre servitude énergétique : les sociétés de consommation sont de plus en plus dépendantes de sources d'énergie saturées, pour l'essentiel fossiles, et elles savent que pour entretenir leur système de production et de consommation elles doivent pourtant continuer à « croître », c'est-à-dire à disposer de plus en plus d'énergie de plus en plus rapidement. Or, à la différence des précédentes crises, où la découverte d'une nouvelle source d'énergie primaire semblait suffire à résoudre le problème en relançant un cycle de croissance, nos sociétés se savent désormais menacées par les effets nocifs et irréversibles que provoque leur mode de développement, notamment le changement du climat induit par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Elles se trouvent ainsi mises dans un cercle vicieux : le mouvement continu de ce cercle n'est possible qu'à la condition que la croissance ne s'arrête pas ; or le combustible de cette croissance, lui, risque de s'épuiser un jour.

Face à ce problème, qui est un problème planétaire, mais aussi un problème qui se décline à l'échelle de chacun des particuliers que nous sommes, il serait irresponsable de faire comme si de rien n'était en feignant de croire que la recherche résoudra tous les problèmes : les ruptures technologiques, si nous devons impérativement les préparer et les rechercher, ne peuvent constituer notre seul espoir, car certaines de ces ruptures demeurent très hypothétiques. La vocation de la science n'étant pas de tout résorber, nous ne devons pas céder aux dérives utopiques qui nous entraîneraient si loin du problème qu'elles finiraient par nous faire croire qu'il sera résolu à coups de *business as usual*. Il ne s'agit d'ailleurs là que d'une simple affaire de cohérence : on ne peut pas demander aux principes intellectuels et matériels qui ont servi à façonner notre monde et qui servent maintenant à établir le diagnostic d'aussi préconiser les remèdes.

Le sentiment est ainsi apparu qu'une crise était en cours ou à venir : nous avons pris acte du problème en même temps que de la terrible difficulté à le résoudre. La conscience collective, bien que largement convaincue de la nécessité d'inventer de nouveaux comportements en matière d'usage de l'énergie, semble à la fois paralysée et irrésolue. Tétanisée par l'obstacle, hésitante quant à la nature et à l'ampleur de la transition à opérer, elle en

vient à douter de ses propres capacités à agir. Ainsi se retrouve-t-elle dans la situation décrite par Hegel (dans *La Phénoménologie de l'esprit*) sous le terme de « conscience malheureuse ».

Cette évolution soumet désormais les technologies à deux forces antagonistes. La première de ces forces est l'agir technologique lui-même, qui diffuse dans tous les aspects de la vie quotidienne. Cette intrusion est même si intense que les technologies semblent transcender la dimension de l'action individuelle de chacun d'entre nous, et même celle de l'action collective. La fonction anthropologique de la technique devient ainsi celle d'une nouvelle divinité, d'un « sacré » non-religieux, mais qui posséderait toutes les caractéristiques d'un dieu tout-puissant. La seconde de ces forces, opposée à la première, est une résistance plus ou moins diffuse, parfois organisée, à cette affluence-influence croissante des objets technologiques. Se manifeste notamment la crainte que nous allions trop vite vers l'inconnu ou céditions à la démesure.

Dans ce nouveau contexte, on somme les scientifiques (les ingénieurs comme les chercheurs) d'éviter à tout prix non seulement la catastrophe, mais également l'ombre de toute catastrophe possible. De façon légitime, il leur est demandé de davantage réfléchir à ce qu'ils font et de mieux dire ce qu'ils pensent de ce qu'ils font.

C'est à cette injonction qu'ont répondu les auteurs de cet ouvrage. Ils ont eu le courage intellectuel de prendre, en la matière, le taureau par les cornes. Ils ont fait l'effort de penser ensemble toutes les données que nous recensons, celles qui concernent les modifications de notre milieu, celles qui concernent le fonctionnement de la biosphère, celles qui concernent l'état et l'évolution des ressources naturelles. Et ils se sont posé une question qui ne l'est pas assez : le high tech est-il vraiment mieux que le low tech ?

Brèves remarques sur les choix technologiques dans l'Histoire



François Jarrige est historien à l'université de Bourgogne. Il s'intéresse à l'histoire sociale de l'industrialisation, des techniques et de l'environnement. Il a notamment publié **Technocritiques : Du refus des machines à la contestation des technosciences** (La Découverte, 2014) et **La Modernité désenchantée. Relire l'histoire du 19^{ème} siècle** (avec E. Fureix, La découverte, 2015).

L'intérêt pour les low tech s'inscrit dans une longue généalogie de réflexions sur les trajectoires et les choix techniques. Dans les années 1960-1970, beaucoup ont cherché à définir ce que seraient des technologies douces. Qu'il s'agisse des technologies « intermédiaires » (E. F. Schumacher), « libératrices » (M. Boochkin), « démocratiques » (L. Mumford) ou encore « conviviales » (I. Illich), il s'agissait d'imaginer des trajectoires techniques à petite échelle, décentralisées, sobres en énergie, respectueuses de l'environnement et à forte utilisation de main-d'œuvre.

S'émancipant des alternative trompeuses et trop binaires en terme de refus ou d'acception des techniques, ces auteurs et beaucoup d'ingénieurs et d'expérimentateurs avec eux, ont cherché à penser ce que serait des dispositifs à la fois socialement bénéfiques, écologiquement durables et politiquement démocratiques. Contre l'idée que les techniques sont neutres et que seul leur usage définit leur sens, les théoriciens et promoteurs des technologies douces – qui ressurgissent aujourd'hui sous le terme low tech – considéraient qu'il ne suffit pas d'intervenir par la fiscalité, le droit ou les prix pour réguler les changements, c'est le type même des technologies et des infrastructures matérielles utilisées qui devait être interrogé.

L'âge d'or des années 1970

Les années 1970 ont été l'âge d'or de ces technologies douces et des mouvements sociaux qui les portaient. Les publications et les expérimentations ont alors été innombrables, notamment aux Etats-Unis. Face au déferlement des nouveaux objets, aux débats sur la crise de l'énergie et aux vastes projets grandioses hérités de la guerre froide, beaucoup se sont tournés vers des outils sobres et fabriqués de façon artisanale, certains croyaient même que ces « technologies douces » allaient quitter leur « ghetto "marginal" » pour conquérir le monde¹. Pourtant le mouvement disparut rapidement au cours des années 1980² et l'enthousiasme initial est retombé avant de renaître timidement aujourd'hui.

¹ L. Samuel et D. Simonnet, « Technologies douces », in, L'homme et son environnement: De la démographie à l'écologie, Paris, Encyclopédie moderne, 1976, p. 477.

² L. Winner, La baleine et le réacteur. À la recherche des limites de la haute technologie, 1986 ; traduit en français par M. Puech, Descartes & Cie, Paris, 2002.

Si ce mouvement reste mal connu en France, il a été abondamment étudié aux États-Unis, notamment par Langdon Winner qui date sa disparition de l'élection de Ronald Reagan à la présidence des États-Unis en 1980. L'échec tient à de nombreux facteurs: le poids des grands lobbies industriels, les choix d'investissements, la compétition internationale exacerbée, l'aspect naïf de nombreuses expériences, ou encore les difficultés de définition : quels outils, quels instruments, quels appareils, quelles machines, quel réseau ou système technique adopter ? Selon quels critères peut-on en effet juger du caractère doux, démocratique ou convivial d'une technique ? Ces questions demeurent décisives. Les techniques douces devaient ainsi être écologiquement saines, peu gourmandes en énergie, ne polluant pas ou peu, être façonnées avec des matériaux recyclables, elles devaient fonctionner très longtemps, favoriser l'emploi et la polyvalence contre l'obsession de la productivité et l'hyper-spécialisation, permettre une intervention manuelle et artisanale, être appropriables localement. Mais ce type de liste soulève de multiples problèmes et les critères définissant ce que pourrait être une bonne technologie émancipatrice sont ambigus et souvent contradictoires entre eux. Ainsi, l'aspect décentralisé ou profitable en termes d'emploi n'est pas nécessairement conciliable avec le caractère écologiquement bénéfique de tel ou tel dispositif.

Retrouver les alternatives passées

L'urgence de ces réflexions s'impose plus que jamais à l'heure de l'effondrement écologique global, de l'épuisement des ressources, et du chômage de masse. Mais les low tech et leurs défenseurs demeurent mal connus, rejetés de nos imaginaires comme des trajectoires périmées, absents des grandes histoires héroïques des techniques célébrant le génie des grands inventeurs, l'innovation et les découvertes qui ont changé le monde. L'histoire des techniques reste souvent le récit de l'avènement des high tech, de l'accroissement de la productivité et du gigantisme. Les sources à partir desquelles s'écrit l'histoire privilégient certains types de techniques sur d'autres, elles donnent le premier rôle aux grands dispositifs spectaculaires qui frappent l'opinion et retiennent l'attention des pouvoirs. Elles privilégient les outils permettant l'accumulation de puissance sur les technologies douces qui visaient l'autonomie. L'importance des technologies douces n'a donc cessé d'être minorée alors même qu'elles constituaient le monde technique dominant des populations et que leurs partisans étaient plus nombreux qu'on ne le pense.

Depuis les débuts de l'industrialisation, de nombreux observateurs ont en effet dénoncé les ravages écologiques et sociaux des nouvelles techniques de production capitalistes et tenté d'imaginer d'autres dispositifs permettant d'instaurer une harmonie avec le monde. Les premiers socialistes du XIX^e siècle comme Charles Fourier dénoncent fréquemment les effets avilissants et dégradants des machines de leur temps, ils repoussent la technologie bourgeoise comme un instrument d'accroissement des inégalités et, parfois, de danger pour l'intégrité physique du globe. Souvent ingénieurs, ils

croyaient pourtant au progrès de la science ; pour réconcilier leur aspiration à l'égalité et leur foi dans le progrès technique ils ont tenté d'imaginer des technologies qui seraient à la fois harmonieuses et bénéfiques au plus grand nombre. Outre Manche, le poète John Ruskin rêve de son côté dans les années 1870 d'une communauté idéale où les machines qui suppriment l'exercice physique et le travail artistique seraient interdites, seuls seraient utilisés les outils permettant l'épanouissement de la créativité individuelle. Contre les machines à vapeur qui polluent et exploitent, les seuls moteurs autorisés seront ceux qui utilisent les forces naturelles du vent et de l'eau.

Certains moments de changement des systèmes techniques furent particulièrement propices à ce type de réflexion comme le fut l'apparition de l'électricité à la fin du 19^{ème} siècle ou celle du numérique un siècle plus tard. Toutes les deux ont inauguré l'espoir d'un monde technique plus doux, décentralisé et socialement plus acceptable que la grande industrie capitaliste, avant d'être réinvesties par les logiques du gigantisme. Après la Seconde Guerre mondiale, alors que les transferts techniques s'intensifiaient vers les pays du Sud, certains ont également contesté l'exportation sans nuance des grandes technologies occidentales peu adaptées aux besoins du Tiers Monde.

Des mondes de techniques douces

Mais au-delà de ces multiples projets et utopies cherchant à réorienter le sens de l'évolution technique, c'est la réalité même des objets techniques du passé qui doit être réexaminée. L'histoire des techniques est largement une histoire mythique³. Contre le schéma modernisateur polarisé par la seule innovation et identifiant l'industrie aux vastes machines et infrastructures imaginées par les laboratoires et les multinationales, ce sont les outils simples, ordinaires, bricolés qui ont longtemps façonné la vie des individus et accompagné l'industrialisation. Vivant dans un monde aux ressources et à l'énergie rare, les sociétés passées ont longtemps privilégié les low tech en recourant prioritairement à des outils simples, peu coûteux et fabriqués localement.

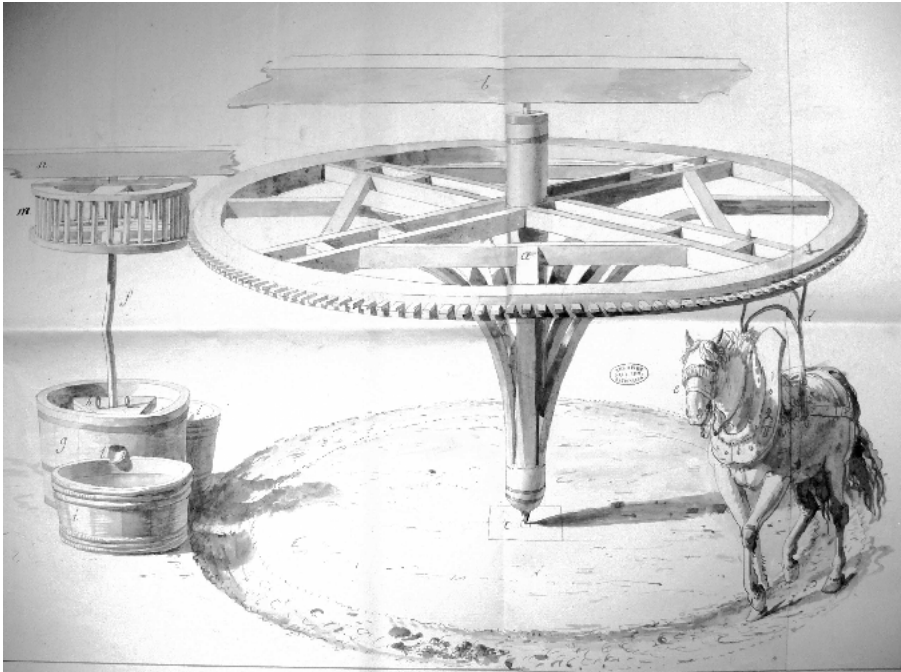
Au 19^{ème} siècle, à côté de la production de masse encore minoritaire qui employait des machines spécialisées et du travail déqualifié afin de produire des biens standardisés, il existait ainsi une production « flexible » fondée sur un travail qualifié et des machines souples, qui permettent la fabrication de produits variés en utilisant la force humaine. Avant de s'imposer massivement au 20^{ème} siècle, l'automatisation, le taylorisme et les énergies dites fossiles restèrent longtemps limités en dehors de quelques régions.

L'énergie hydraulique et la force animale ont fait l'objet de nombreuses améliorations et perfectionnements avant d'être rendus peu compétitifs par le bon marché des énergies fossiles ; aujourd'hui encore les

³ D. Edgerton, Quoi de neuf. Du rôle des techniques dans l'histoire globale, Paris, Le Seuil, 2013.

techniques agricoles douces et les animaux de travail restent abondamment utilisés dans le monde et sont souvent plus efficaces et adaptées aux enjeux locaux que les vastes machines fonctionnant au pétrole ou les high tech imaginées dans les laboratoires de la Silicon Valley.

L'histoire des techniques devrait cesser d'être le récit linéaire de la victoire inéluctable des high tech sur les technologies anciennes pour penser plutôt la rivalité constante entre hautes et basses technologies, entre des technologies de la puissance fondées sur l'exploitation des ressources et la spécialisation des tâches et des technologies sobres et économes vers lesquelles devrait s'orienter la créativité des ingénieurs, malgré la pression des actionnaires et des pouvoirs publics ■



Moulin à minium, gravure du 19^{ème} siècle

Choix technologiques et durabilité : l'impasse du « tout high tech » et de la « Troisième Révolution Industrielle » ?



Jacques Millery (*Ecole Centrale Paris 1990*) a fait une carrière internationale dans le consulting et les services high tech, avant d'avoir depuis plusieurs années la direction d'activités touchant au développement durable et à la transformation du secteur de l'énergie et des utilities, au sein d'un grand groupe de taille mondiale.

L'anthropocène, âge où l'humanité est devenue une force géologique, nous amène désormais à réfléchir aux conditions de la « durabilité » de notre société humaine. Instrument majeur du progrès depuis les débuts de l'époque moderne, la technologie est bien sûr au centre de cette réflexion. Nous avons développé un appétit constant pour l'utilisation effrénée de l'application des dernières connaissances techniques. Mais un tel comportement généralisé est-il précisément celui qui maximise nos chances de pérenniser notre civilisation ? Le « tout high tech » est-il le meilleur moyen d'être encore là dans quelques siècles ? Plus particulièrement, la Troisième Révolution Industrielle (TRI), popularisée par Jeremy Rifkin, et ses paris technologiques, est-elle vraiment la voie de notre durabilité ?

Durabilité d'un système : les leçons de l'évolution

Quelles sont les conditions de la durabilité d'un système ? Les grands principes de l'évolution (qui ont permis à la vie de durer jusqu'à nos jours) sont ici riches d'enseignement, et permettent de caractériser la durabilité comme la combinaison de :

- La capacité à évoluer pour rester adapté à un environnement qui se modifie progressivement ;
- La capacité à dépasser une perturbation brutale de cet environnement.

Les conditions de la durabilité sont donc l'efficacité (amélioration des critères d'adaptation à l'évolution lente de l'environnement) et la résilience (résistance aux aléas et garantie de la pérennité des fondamentaux).

Si l'efficacité nous est familière, il est important de ne pas oublier les principales caractéristiques qui font la résilience d'un système :

- Facilement réparable, il doit donc conserver un fonctionnement compréhensible pour ses acteurs ;
- Continuant à fonctionner en mode dégradé, il nécessite un design redondant pour certaines parties critiques ;
- Sa reconstruction doit pouvoir être assurée, avec des ingrédients dont on peut être sûr de la disponibilité.

¹ « Sustainability »

Ces caractéristiques importantes de la résilience permettent d'équilibrer les effets de l'efficacité dans le but de la durabilité. Une rupture de l'équilibre entre efficacité et résilience pourra au contraire affecter cette durabilité, un excès d'efficacité conduisant à la fragilité et un excès de résilience à la stagnation.

Le tout high tech : trop focalisé sur l'efficacité, pas assez sur la résilience

Reconnaissons que les high tech (c'est-à-dire l'ensemble des techniques avancées touchant les domaines les plus récents : aérospatiale, biotechnologies, technologies de l'information, nanotechnologies, robotique, etc.) ont fait la preuve de leur efficacité. En moins d'une génération, puissance de calcul et puissance de stockage ont été multipliées par un facteur de plus de 100 millions, permettant la recherche d'une optimisation de plus en plus poussée de tout type de processus ou interaction. L'efficacité est donc au rendez-vous. Mais quid des critères de résilience ?

- Une réparabilité limitée : difficile en effet de changer le contrôleur vidéo de la carte mère de son téléphone portable ;
- La complexité : l'empilement des couches et des algorithmes rend extrêmement ardue la prévision du comportement de nos systèmes d'information, que ce soit celui d'un ordinateur au moment du passage à l'an 2000 ou celui de robots d'une salle de marché ;
- Peu ou pas de fonctionnement en mode dégradé : qui peut faire redémarrer sa voiture dont le moteur n'est plus alimenté suite à un flash de l'électronique du système d'injection ?
- Une redondance limitée : une coupure d'électricité peut aujourd'hui affecter l'approvisionnement en eau ou en essence ;
- L'utilisation de matériaux rares (l'argent ou l'indium par exemple) nécessitant pour leur extraction et leur affinage des ressources dont la disponibilité future n'est pas garantie. Ainsi, l'eau, le carburant et les produits chimiques nécessaires à la fabrication d'un PC représentent entre 1,5 et 2 tonnes de matériaux...
- Un travail à des dimensions proches de la dimension atomique, générant un usage dispersif de ces matériaux. Près de 7 000 tonnes² d'or sont ainsi incluses dans les déchets électroniques des décharges japonaises !

Extraordinairement efficace, la high tech n'est donc pas exempte de risques. Et son utilisation pour limiter certains risques peut même en générer d'autres. Ainsi, la mise en réseau permise par les puissances de calcul actuelles offre de nouveaux degrés de liberté aux systèmes, malheureusement pas toujours sur des dimensions soumises à une loi de Gauss (mais au contraire à une loi de puissance) ; d'où une augmentation

² Source : Sumitomo Corporation

de la possibilité d'effets papillon, parfois dévastateurs, comme les nombreux « microcrashes » sur les marchés financiers (qui peuvent nécessiter la coupure physique de certains serveurs).

Au-delà du « hype » actuel qui nous fait considérer de manière bienveillante toute « fuite en avant » technologique, il convient donc d'être prudent : impossible de construire une société durable en ne misant que sur la high tech.

La « Troisième Révolution Industrielle » tuée dans l'œuf ? Ou comment le socle trop high tech d'un nouveau modèle se heurte aux limites imposées par la physique et la réalité

Que penser alors d'un modèle comme celui de la « Troisième Révolution Industrielle » (TRI) proposé par Jeremy Rifkin, modèle qui fait la part belle à l'utilisation de la high tech? Cette approche, il faut bien l'avouer, a tout pour être séduisante. Fort d'une analyse pertinente des problèmes créés par la société d'aujourd'hui (changement climatique, impasse à terme des énergies fossiles), Rifkin vise à créer une société plus durable. Il fait ainsi reposer la TRI sur cinq piliers :

- Transition carbone et nucléaire vers renouvelable
- Reconfiguration des infrastructures et bâtiments
- Technologies de l'hydrogène et de stockage dans chaque bâtiment
- Développement de smart grids bidirectionnels
- Transition des transports vers hybride / pile à combustible

Par ailleurs, sa TRI repose a priori sur une volonté de résilience, en pensant à une organisation distribuée plutôt que centralisée.

Mais une telle approche résiste-t-elle à l'œil de l'ingénieur ? Est-il raisonnable, par exemple, de se focaliser sur production, transport, et stockage de l'électron, même dans les cas où il s'agit de produire de la chaleur ? Une telle revue nous semble nécessaire, d'autant plus que certaines imprécisions dans les explications techniques peuvent laisser penser que le modèle n'a pas été étudié de manière suffisamment détaillé pour en valider la faisabilité : confusion entre puissance et énergie (GW, GWh et GWh¹), entre installations solaires thermiques et photovoltaïques, aucune considération sur les méthodes d'isolation des bâtiments, pourtant nécessaires si l'on veut des bâtiments à énergie positive ... De manière générale, les problèmes de viabilité posés par l'approche de Rifkin s'avèrent ainsi de plusieurs ordres :

1) Une sous-estimation des ressources nécessaires à la construction et au fonctionnement des infrastructures nécessaires à son modèle :

Le projet requiert en effet d'énormes infrastructures (informatique, télécommunications, production énergie renouvelable, imprimantes 3D, etc.). Avec la déconstruction des actifs aux technologies dépassées du « monde

¹ le GWh correspond au GW de crête

d'avant », ce sont des centaines de millions de microcentrales électriques, de bâtiments équipés, de nouveaux véhicules, qui doivent être construits, nécessitant des quantités énormes d'énergie et de métaux parfois rares (comme le cuivre, le cobalt ou l'argent, en voie de raréfaction, sans substituts, servant à la production de circuits électriques et électroniques).

Et les choix techniques ne font rien pour contenir la taille de l'infrastructure nécessaire. Ainsi, un réseau d'hydrogène nécessite une infrastructure trois fois plus coûteuse que le méthane par rapport à l'énergie transportée.

De même, comme l'a montré Jean-Marc Jancovici, la mise en place de sources d'énergie décentralisées et fluctuantes nécessite de multiplier par 4 à 8 la puissance installée. Avec en plus le stockage nécessaire et la durée de vie limitée des actifs, il en résulte un besoin de moyens plus de 10 fois supérieurs aux solutions centralisées actuelles. Raisonnable, lorsque le nouveau modèle nécessite encore énormément d'énergie et de ressources pour tourner ?

Car le modèle de Rifkin reste gourmand. Ainsi, il faudra plus de matière (pour assurer protection des systèmes, mise en réseau, etc.) et d'énergie (déplacements nécessaires) pour mettre en place et maintenir 100 petites installations plutôt qu'une seule 100 fois plus grande.

Que dire aussi de la généralisation de millions d'imprimantes 3D, au bilan matière « cradle to grave » pas vraiment convaincant ?

De même, les réserves de platine mondiales ne permettraient au mieux que de fabriquer des piles à combustible pour 800 millions de véhicules – avec un renouvellement du parc mondial en conséquence prenant d'ailleurs près de 100 ans !

Or ces piles sont nécessaires au modèle. Quant aux gains de productivité attendus dans les services, rappelons que ceux-ci sont associés à une automatisation accrue, soit une consommation supplémentaire d'énergie et de métaux...

2) Une surestimation de la capacité de production et de stockage de l'énergie nécessaire au modèle : quelques problèmes d'ordre de grandeur à régler...

Rifkin oublie la quantité astronomique d'énergie avec laquelle nous fonctionnons aujourd'hui, et notamment l'importance des moyens de stockage d'énergie permise par les hydrocarbures : l'énergie contenue dans 1 kg de pétrole correspond à 30 kg d'hydrogène, ou encore à 300 kg de batteries, c'est-à-dire à 43 tonnes d'eau chutant de 100 m !

Son modèle énergétique fondé sur les bâtiments à énergie positive pose ainsi un problème d'ordre de grandeur. En effet, un tel bâtiment aujourd'hui a déjà du mal à couvrir tout juste ses besoins propres. Comment alors imaginer qu'il puisse produire suffisamment d'énergie pour la construction d'autres bâtiments (l'énergie produite par un bâtiment à énergie positive en 1 an correspond à 1/50 de l'énergie pour le construire) et les autres besoins de la communauté (mobilité locale, industrie, agriculture, etc.) ?

Et il manque bien « 1 à 2 zéros » dans ce qui est produit pour permettre un tel équilibre, un peu comme si l'on s'imaginait faire marcher notre plaque électrique en pédalant... De la même manière, difficile d'imaginer un stockage « high tech » à grande échelle de manière distribuée comme il le propose. Tout d'abord pour un simple problème de rendement du cycle conversion et reconversion (électricité/H₂/CO₂/méthane/électricité) puis stockage, 2 fois inférieur au rendement d'un STEP³ centralisé actuel. On est loin de l'« internet de l'énergie » : que deviendrait internet si l'on perdait 25% de l'information à chaque échange ?

Et les progrès à attendre sur les batteries par effet d'échelle ne sont pas si évidents : ainsi, 1 milliard de véhicules avec des batteries classiques au plomb n'ont permis un progrès que vers le lithium, seulement 5 fois plus efficace pour un coût 20 fois plus élevé.

Le stockage se verra bien sûr aussi limité par la quantité de métaux rares nécessaires (batteries, platine nécessaire aux piles à hydrogène des véhicules). Sans compter que la transformation du parc de véhicule avec des piles à hydrogène entraînerait au passage des besoins accrus de 50% en électricité (l'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais juste un moyen de stockage ; il n'y a pas d'hydrogène sur terre à l'état naturel).

Enfin, le modèle proposé par Rifkin considère comme négligeable les coûts de télécommunications liés à son fonctionnement en réseau. C'est oublier que la capacité de traitement d'un réseau doit suivre le carré de ses nœuds, ce qui contrecarre les économies de puissance permises par la loi de Moore. Ainsi, la consommation des réseaux télécom, de l'ordre de 9% de l'électricité mondiale en 2008, devra atteindre 20% de celle-ci en 2020. Ceci sans même comptabiliser les appareils qui lui sont connectés...

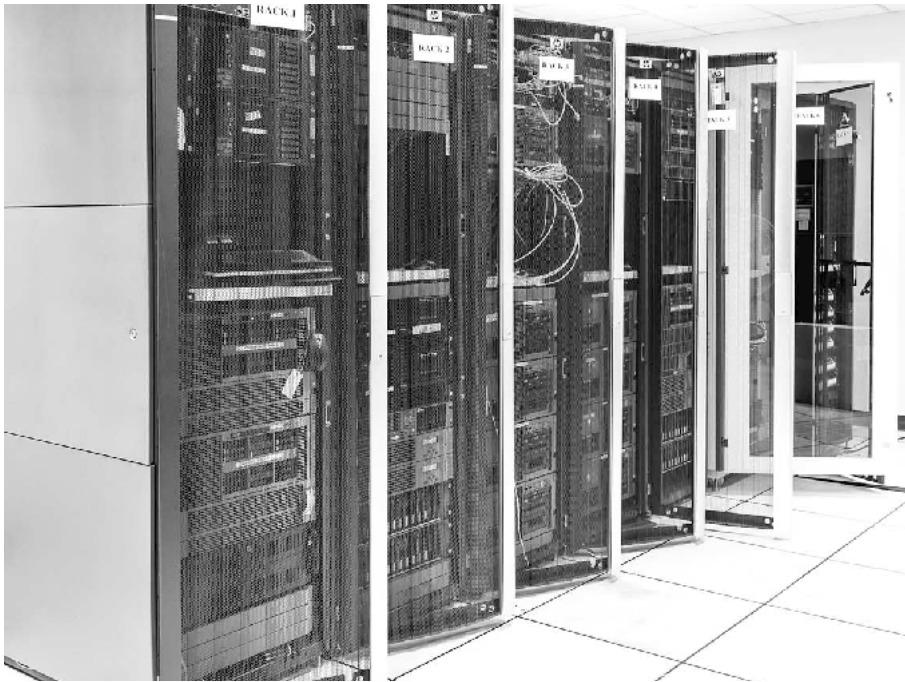
3) Une surestimation de l'efficacité d'un mode d'organisation diffus pour concevoir et produire les infrastructures nécessaires

Au-delà des problèmes d'ordre de grandeur posés par le modèle énergétique de la TRI, c'est le mode d'organisation diffus choisi par Rifkin qui dans certains cas devient lui-même un énorme défi. On peut ainsi s'interroger sur les points suivants :

- Comment par exemple couvrir d'énormes besoins en infrastructure et en maintenance, sans être obligé de faire appel à des grands groupes industriels centralisés traditionnels ?
- Comment maintenir en permanence un équilibre énergétique entre offre et demande sur le réseau électrique avec un écart maximum de 5% pour que celui-ci ne « tombe » pas, si l'on n'a pas une instance centralisée gérant tout cela, même à un niveau local ?

³ Station de Transfert d'Énergie par Pompage

- 30% de la production d'acier actuelle sert à remplacer les pièces métalliques rouillées de nos infrastructures : comment continuer dans le modèle de Rifkin à produire cet acier qui reste nécessaire (et demande des puissances importantes pour sa fabrication) ?
- Peut-on imaginer des particuliers gérer eux-mêmes le stockage de l'hydrogène chez eux en mode diffus, stockage qui nécessite des installations conséquentes ?



Conclusion

Comme illustré par l'exemple de l'analyse du modèle de « Troisième Révolution Industrielle », le simple recours aux dernières technologies high tech ne permet pas à lui seul, comme par magie, la construction d'un système durable. L'innovation durable résultera en fait de l'ingénierie de systèmes sachant conjuguer la résilience de solutions simples, peu gourmandes en ressources, avec une utilisation mesurée à bon escient des technologies de pointe amenant un supplément d'efficacité au bon endroit. Bref, un champ d'investigation passionnant pour les ingénieurs des générations futures ...

Vers des technologies sobres et résilientes



Philippe Bihouix (*Ecole Centrale Paris 1996*) a travaillé dans différents secteurs industriels (bâtiment, chimie, énergie, transports) comme chef de projet, ingénieur conseil puis dirigeant. Il est auteur de *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* (Seuil, 2014) et membre fondateur de l'Institut Momentum (*L'anthropocène et ses issues*).

I l faut l'admettre : les problèmes environnementaux auxquels nous faisons face ne pourront pas être résolus simplement par une série d'innovations technologiques et de déploiements industriels de solutions alternatives. Nous allons nous heurter en effet à deux problèmes : il faut des ressources métalliques pour capter les énergies renouvelables ; ces ressources ne peuvent qu'être imparfaitement recyclées, ce phénomène s'aggravant avec l'utilisation de hautes technologies. A terme, nous devons en passer par la sobriété et développer des technologies adaptées beaucoup plus économes en énergie et ressources.

Energies et ressources sont intimement liées

Certes, les énergies renouvelables ont un potentiel énorme et les scénarii sur des mondes «énergétiquement vertueux» ne manquent pas : Troisième Révolution Industrielle du prospectiviste Jeremy Rifkin, plan Wind Water Sun du professeur Jacobson de l'université de Stanford... Tous sont basés sur des déploiements industriels très ambitieux – 3,8 millions d'éoliennes de 5 MW et 89 000 centrales solaires de 300 MW à installer en 15 ans pour Wind Water Sun, soit 30 fois le rythme actuel pour l'éolien, et l'inauguration de quinze centrales solaires par jour !

Rien d'impossible sur le papier, mais il faudrait alors une véritable économie de guerre, pour organiser l'approvisionnement en matières premières – acier, ciment, résines polyuréthanes, cuivre, néodyme –, la production des équipements, la logistique et l'installation (bateaux, grues, bases de stockage...), la formation du personnel ... Sans parler des dispositifs de transport et de stockage de l'électricité !

Mais l'irréalisme tient davantage aux ressources qu'aux contraintes industrielles ou financières. Car il faut des métaux pour capter, convertir et exploiter les énergies renouvelables. Moins concentrées et plus intermittentes, elles produisent moins de kWh par unité de métal mobilisée que les sources fossiles. Certaines technologies utilisent des métaux plus rares : argent, tellure, indium, sélénium... Il faut aussi des métaux pour les équipements annexes, câbles, onduleurs ou batteries.

Nous disposons de nombreuses ressources métalliques, mais leur qualité et leur accessibilité se dégradent, car nous exploitons un stock de minerais qui ont été créés, enrichis par la nature « vivante » de la planète : tectonique des plaques, volcanisme, cycle de l'eau, activité biologique... Logiquement, nous avons exploité d'abord les ressources les plus concentrées, les plus simples à extraire. Les nouvelles mines ont des teneurs plus basses que les mines épuisées – ainsi du cuivre, passé d'une moyenne de 2% dans les années 1930, à 0,5% dans les nouvelles mines – ou bien sont moins accessibles, plus dures à exploiter, plus profondes. Il faut alors dépenser plus d'énergie pour les exploiter.



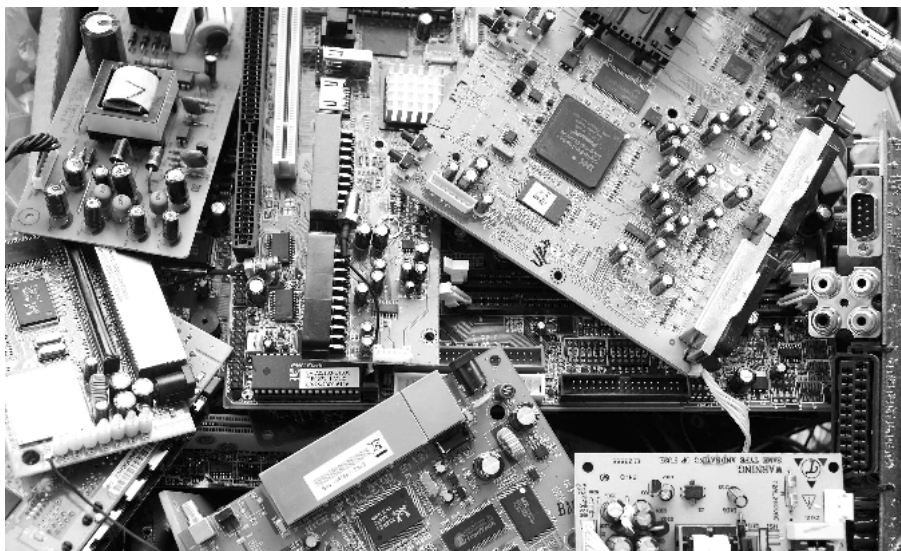
Si nous n'avions qu'un problème d'énergie et de climat, il « suffirait » de tartiner le monde de panneaux solaires, d'éoliennes et de smart grids. Si nous n'avions qu'un problème de métaux, mais accès à une énergie concentrée et abondante, nous pourrions continuer à exploiter la croûte terrestre à des concentrations toujours plus faibles. Mais nous faisons face à ces deux problèmes au même moment, et ils se renforcent mutuellement : plus d'énergie nécessaire pour extraire et raffiner les métaux, plus de métaux pour produire une énergie moins accessible.

Utopie de l'économie circulaire et fausse promesse de la croissance « verte »

Les ressources métalliques, une fois extraites, ne disparaissent pas. L'économie circulaire devrait donc être une réponse logique à la pénurie métallique. Mais celle-ci ne pourra fonctionner que très partiellement si l'on ne change pas radicalement notre façon de produire et de consommer.

D'abord parce qu'il faut pouvoir récupérer physiquement la ressource pour la recycler, ce qui est impossible dans le cas des usages dispersifs. Les métaux sont couramment utilisés comme produits chimiques, additifs, dans les plastiques, les encres, les peintures, les cosmétiques et bien d'autres produits : 5% du zinc, 10 à 15% du manganèse, du plomb et de l'étain, 15 à 20% du cobalt et du cadmium, et 95% du titane dont le dioxyde sert de colorant blanc universel.

Ensuite parce qu'il est difficile de recycler correctement. Nous concevons des produits d'une diversité et d'une complexité inouïes, à base de composites, d'alliages, de composants de plus en plus miniaturisés et intégrés... mais notre capacité, technologique ou économique, à repérer les différents métaux ou à les séparer, est limitée. C'est particulièrement vrai de l'électronique, et de nombreux métaux high tech et autres terres rares sont recyclés à moins de 1%.



La croissance « verte » telle que définie actuellement ne fera qu'aggraver ces phénomènes, car elle repose essentiellement sur des innovations technologiques non réfléchies, basées sur des métaux moins répandus,

aggravant la complexité des produits, faisant appel à des composants high tech plus durs à recycler. Ainsi des voitures, où le besoin de maintenir le confort, la performance et la sécurité nécessite des aciers alliés toujours plus précis pour gagner un peu de poids et réduire les émissions de CO₂.

L'idée des « low tech »

Il nous faut prendre la vraie mesure de la transition nécessaire et admettre qu'il n'y aura pas de « sortie par le haut » à base d'innovations purement high tech (ou qu'en tout cas il serait bien périlleux de tout miser dessus). Nous devons faire baisser, en valeur absolue, la quantité d'énergie et de matières consommées. Il faut travailler sur la baisse de la demande, pas seulement sur le remplacement de l'offre, le tout en conservant un niveau de « confort » acceptable.

C'est toute l'idée des low tech, les « basses technologies », par opposition aux high tech. Il s'agit avant tout d'une démarche, orientée vers l'économie réelle de ressources, ni obscurantiste ni opposée à l'innovation ou au « progrès », mais recherchant les technologies les plus appropriées (passées, présentes ou futures), et qui consiste à se poser trois questions.

Pourquoi produit-on ? Il s'agit d'abord de questionner intelligemment nos besoins, de réduire à la source, autant que possible, le prélèvement de ressources et la pollution engendrée. C'est un exercice délicat car les besoins humains (nourris par la rivalité mimétique) étant a priori extensibles à l'infini, il est impossible de décréter « scientifiquement » la frontière entre besoins fondamentaux et « superflu », qui fait aussi le sel de la vie.

Il y a toute une gamme d'actions imaginables, plus ou moins compliquées, plus ou moins acceptables. Certaines devraient logiquement faire consensus ou presque, à condition de bien exposer les arguments : suppression de certains objets jetables, des supports publicitaires, de l'eau en bouteille... D'autres seront un peu plus difficiles à faire passer : retour de la consigne, réutilisation des objets, compostage des déchets, limite de vitesse des véhicules... D'autres enfin promettent quelques débats houleux : réduction drastique de la voiture au profit du vélo, adaptation des températures dans les bâtiments, urbanisme revisité pour inverser la tendance à l'hyper mobilité ...

Que produit-on ? Il faut ensuite augmenter considérablement la durée de vie des produits, bannir la plupart des produits jetables ou dispersifs, s'ils ne sont pas entièrement à base de ressources renouvelables et non polluantes, repenser en profondeur la conception des objets : réparables, réutilisables, faciles à identifier et démanteler, recyclables en fin de vie sans perte, utilisant le moins possible les ressources rares et irremplaçables, contenant le moins

d'électronique possible lorsque ce n'est pas justifié, quitte à revoir notre « cahier des charges », accepter le vieillissement ou la réutilisation de l'existant, une esthétique moindre pour les objets fonctionnels, parfois une moindre performance ou une perte de rendement... en gros, le moulin à café et la cafetière italienne de grand-mère, plutôt que la machine à expresso dernier cri !

Comment produit-on ? Il y a enfin une réflexion à mener sur nos modes de production. Doit-on poursuivre la course à la productivité et à l'effet d'échelle dans des giga-usines, ou faut-il mieux des ateliers et des entreprises à taille humaine ? Ne doit-on pas revoir la place de l'humain, le degré de mécanisation et de robotisation parfois injustifié, la manière dont nous arbitrons aujourd'hui entre main-d'œuvre et ressources / énergie ? Et puis il y a la question aiguë de la territorialisation de la production. Après des décennies de mondialisation facilitée par un coût des transports suffisamment bas, le système actuel, basé sur une Chine « usine du monde » et des flux complexes et mondialisés, est-il vraiment résilient face aux risques de perturbations futures ?



Un projet de société

Compte-tenu des forces en présence et des tendances de fond, il y a bien sûr une part utopique dans un tel projet de société. Mais n'oublions pas que le scénario de statu quo, de maintien *ad vitam aeternam* de notre civilisation industrielle sur ses bases actuelles, de sa fragile trajectoire « accélérationniste », est probablement encore plus irréaliste. Pourquoi ne pas tenter une autre route ? Nous avons largement les moyens, techniques, organisationnels, financiers, sociétaux et culturels pour mener une telle transition. A condition de le vouloir ■

Transports : l'automobile face au " toujours plus "



Laurent Castaignède (*Ecole Centrale Paris 1993*) est gérant de *BCO2 Ingénierie*, www.bco2.fr, bureau d'études spécialisé en analyse d'impacts environnementaux, habilité Bilan Carbone®. Il a été notamment responsable du développement des lignes d'échappement et d'un châssis de véhicules utilitaires de Renault.

L'automobile voit déferler depuis son origine des vagues d'améliorations de ses caractéristiques techniques. Son hégémonie est particulièrement marquée en France depuis les années 1960, époque du début de la démocratisation de ce moyen de transport motorisé individuel, réservé jusque-là à la classe aisée.

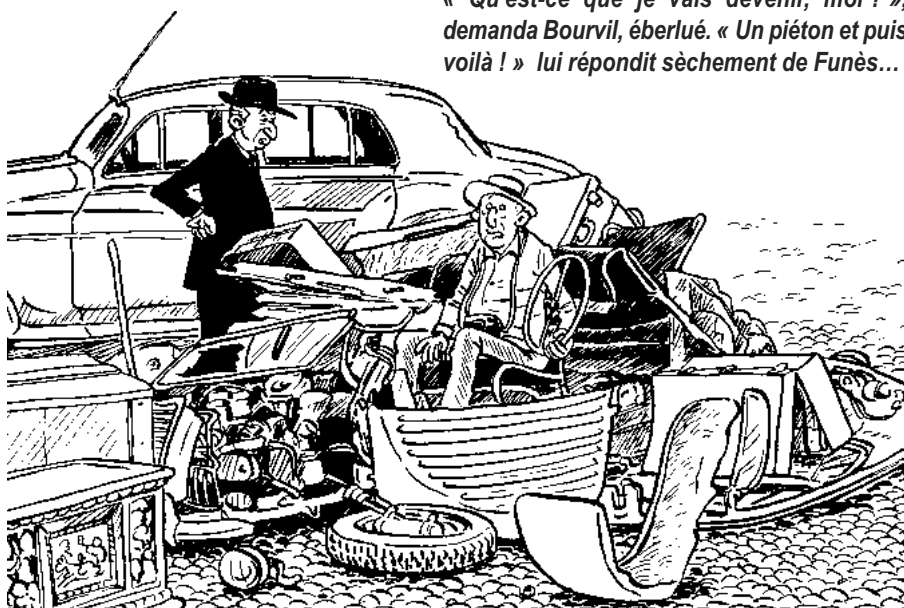
Revenons sur un accident singulier qui marqua son histoire autant que celle du cinéma. Nous sommes en 1964, à Paris, place du Panthéon. Une deux-chevaux se fait voler la priorité par une Rolls-Royce, qui la dévie de sa trajectoire et l'expédie à grand fracas contre un camion de déménagement en stationnement.

La violence du choc réduit le modeste véhicule en pièces détachées. Des décombres s'extirpe son conducteur, volant en main, et heureusement sans une égratignure... Cette scène mythique du film de Gérard Oury, *Le Corniaud*, offre un bel exemple de confrontation entre deux approches de l'automobile : l'une résolument fonctionnelle, l'autre éminemment statuaire.

Les acteurs concernés représentent deux typologies très marquées de propriétaires automobiles. Bourvil (alias Antoine Maréchal) joue le rôle d'un « français moyen » qui a fait récemment l'acquisition de son automobile : ce ne sera qu'en 1968 qu'un ménage français sur deux disposera d'un véhicule. Louis de Funès (alias Léopold Saroyan) joue celui de la classe très aisée et pressée, dont la carte de visite remise promptement fait mention de « Président Directeur Général » (sic).

Leurs véhicules représentent les deux extrémités de la production récente de l'époque. La Citroën est une version de 1963, pesant 530 kg à vide, équipée d'un moteur bicylindre de 425 cm³, de 18 cv, et dotée d'une vitesse de pointe de 95 km/h. La Rolls-Royce est un modèle Silver Cloud, d'environ 2 tonnes à vide, équipée probablement du moteur V8 de 6,2 litres de cylindrée développant près de 190 cv, d'une vitesse maximale de 183 km/h, et capable d'atteindre les 100 km/h en 11 secondes.

*« Qu'est-ce que je vais devenir, moi ? »,
demanda Bourvil, éberlué. « Un piéton et puis
voilà ! » lui répondit sèchement de Funès...*



Aujourd'hui, la voiture particulière moyenne circulant en France pèse plus de 1300 kg, est équipée d'un moteur de près de 110 cv, dispose d'une vitesse de pointe de 180 km/h, et met moins de 12 secondes pour atteindre les 100 km/h : pour peu qu'elle ait une « carrosserie monospace », plus lourde et largement répandue, on constate que la moyenne de notre parc est en passe d'atteindre les caractéristiques des plus puissantes berlines de luxe des années 1960 ...

Ce faisant, les remarquables progrès techniques, mécaniques et électroniques, ont vu la consommation de carburant « progresser » : la 2 cv citée consommait de l'ordre de 5 à 6 litres/100 km, la voiture française moyenne actuelle consomme de 6 à 7 litres / 100 km (en conditions réelles d'utilisation). Certes c'est bien mieux que la Rolls-Royce qui affichait près de 20 litres / 100 km, mais c'est quand même une augmentation unitaire !

Quelles sont les principales raisons de cette absence de réduction des consommations de la voiture du « français moyen » ? Quels leviers majeurs activer pour faire basculer le marché et profiter enfin du progrès technique, sans effet rebond dévastateur ?

Aux sources du gaspillage, il y a l'emballlement des performances dynamiques, conférant au conducteur des performances dignes des anciens bolides de circuits, qu'il ne peut aujourd'hui exploiter sans contrevenir au respect du Code de la Route, tout en empiétant souvent sur la sécurité des autres usagers.

Le premier pas significatif vers cette nécessaire modération relève d'une initiative low tech : il suffirait simplement de disposer des panneaux de limitation de vitesse à 130 km/h sur les dernières autoroutes allemandes non limitées, et gageons que la réglementation européenne instituerait le bridage des performances dès l'année suivante – ce serait du moins logique. Les véritables amateurs de vitesse seraient renvoyés à la location sur circuit, et les constructeurs relégueraient en queue de leurs cahiers des charges les performances dynamiques des véhicules destinés aux routes ouvertes ...

Nous en sommes bien loin. Les campagnes marketing regorgent de références associant les performances dynamiques du véhicule avec celles, supposées, de leur conducteur. Le discours rassure aussi le client sur sa propre sécurité dans un véhicule imposant : « vous serez plus en sécurité dans notre petit tank ». Cela pourrait se résumer ainsi : « Si à 50 ans on n'a pas son 4x4, on a quand même raté sa vie »¹.

Quel est dès lors le véritable bilan carbone du gros 4x4 germanique, porte étendard de cette logique ? Au-delà de l'impact propre à sa fabrication (plus lourd), à sa consommation (plus gourmand), interrogeons-nous sur l'appel au surdimensionnement du parc qu'il génère indirectement : risque accru de dommage de tiers en cas de collision, et signe extérieur de réussite personnelle que son gabarit entend symboliser. Autrement dit, si ce type de véhicule exagérément lourd et inutilement puissant n'existait pas, qu'aurait acheté son actuel propriétaire ? Par mimétisme, « Monsieur-tout-le-monde » aurait-il acheté strictement le même véhicule ? Auraient-ils tous deux troqué cet « embonpoint » et ce « dynamisme » contre un meilleur niveau de finition ? Une évolution en profondeur de la réglementation et des conditions d'homologation des véhicules paraît inévitable, et nous vous proposons ci-après quatre mesures réellement efficaces.

Le bridage des véhicules particuliers à 130 km/h, des véhicules utilitaires à 90 km/h (comme le sont les poids lourds), et de leurs performances d'accélération (avant de cibler des objectifs encore plus ambitieux), pourrait s'accompagner d'une légère entrave au low tech : la limitation automatique de vitesse sur géolocalisation, qui entraînerait d'ailleurs à terme le démontage des ralentisseurs et autres radars automatiques high tech.

La révision des critères de sécurité passive pourrait intégrer l'effet du rapport des masses lors d'un choc : au lieu d'indistinctement crasher les véhicules sur un mur normalisé, en leur demandant d'absorber l'effet de leur masse par leurs propres déformations et systèmes de sécurité, la prise en compte de l'accélération négative subie par un véhicule tiers leur faisant face pénaliserait violemment l'excès de masse embarquée.

¹ Référence à la célèbre réflexion de Jacques Séguéla du 13 février 2009 sur l'horlogerie suisse, dans l'émission « Les 4 vérités » sur France 2.

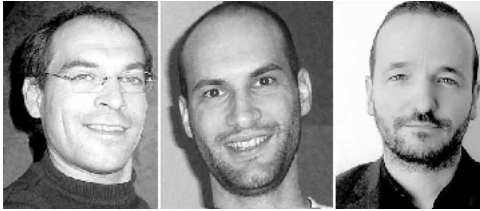
De nouvelles catégories de véhicules particuliers et utilitaires seraient créées et promues : ils cumuleraient une masse très contenue, des performances modestes, et une consommation et une pollution de fait au meilleur niveau, en s'inspirant des « midgets » japonaises.

Une discrimination des conditions d'usage des infrastructures urbaines garantirait leur succès.

Sans devoir changer de véhicule, l'homologation simultanée des variantes de carrosserie permettrait aux « carrossiers » d'en reconfigurer le volume en fonction de l'évolution des besoins du propriétaire, et l'évolutivité du compartiment moteur permettrait aux « motoristes » de substituer une motorisation obsolète par une configuration plus sobre et moins polluante. Vous oblige-t-on à déménager, voire raser votre maison, lorsque vous souhaitez juste réorganiser votre salon, adjoindre un appartement, ou changer votre chaudière ?

Sans remise en cause profonde du triptyque réglementation / offre des constructeurs / désirs des clients, l'impact environnemental global des transports ne cessera d'augmenter, et le prix d'accès à l'énergie finira par s'envoler. Quel avenir pour la « classe moyenne automobile » dans un tel contexte ? « Qu'est-ce que je vais devenir, moi ? », demanda Bourvil, éberlué. « Un piéton et puis voilà ! » lui répondit sèchement de Funès... Il pourra toujours se rabattre sur un vélo, ou les transports en commun, si tant est que les distances et leur accessibilité lui conviennent, ce qui est une autre affaire ...

Bâtiment : Repenser la ville comme un écosystème



Stéphane Cochet, architecte A003
architectes, passiv haus designer

François Bourmaud, Amoès,
ingénieur (Ecole Centrale Paris 2006)

Julien Langé, @atelieracturba,
urbaniste-programmiste

« **Métabolisme urbain et empreintes environnementales sont encore mal connus : les études de cas sont rares, les méthodes [...] en cours d'élaboration [...]. Les enjeux, [...] fondamentaux, dépassent la simple comptabilisation de tonnes, d'hectares, de mètres cubes [consommés] pour réfléchir [...] sur la matérialité des sociétés à l'anthropocène** ». *S.Barles, 2008.*

Les dures lois de la matière

Le modèle économique actuel conduit les populations à se concentrer dans les grandes métropoles. Mais celles-ci ont cessé d'être autosuffisantes. Le phénomène de vampirisation des ressources par ces méga centres urbains s'amplifie. L'histoire du Grand Paris est celle d'une déconnexion entre les cycles biogéochimiques et la ville, entre le 19^{ème} siècle et aujourd'hui. Paris s'est construit à partir des ressources en gypses et en calcaire de son sous sol, du bois flotté en provenance de Bourgogne. La ville fournissait à sa ceinture agricole les engrais dont elle avait besoin grâce à la collecte de résidus urbains. A partir des années 1930 l'essentiel des ressources recyclables (bois, pierre, brique, chiffons, crottin de cheval, poudrette) deviennent des déchets non valorisés et dans les années 1960 le bois d'œuvre issu des démolitions est évacué hors la ville (Francilbois). L'extension des réseaux urbains avec la généralisation du système automobile entraîne l'artificialisation des sols à grande échelle. La construction en béton armé devient hégémonique dans la construction, conduisant à la raréfaction actuelle du sable et des granulats, pointés dans tous les rapports du Grand Paris.

Chaque jour, en Ile de France, 16 000 camions (14% du trafic poids lourds) transportent des déchets de chantier (démolitions et excavations) vers les lieux de stockage de la grande périphérie, sur des terres agricoles rendues stériles (20 millions de tonnes par an). La région exporte ses déchets de plus en plus loin et importe plus de 80% de ses matériaux de construction, au sein d'un métabolisme de plus en plus insoutenable. La part recyclée et valorisée des déchets ne représente que 23% de l'ensemble des déchets produits, qui sont essentiellement stockés ou incinérés. Quant aux biens de consommation, ils sont conteneurisés et parcourent des milliers de kilomètres avant d'être ingérés dans la ville-monde.

L'urbanisme

Quelques exemples de chantiers devant nous

Une telle situation n'est pas gérable sur le long terme. Si nous voulons rendre la ville « soutenable », il nous faut :

- **Freiner cette frénésie de consommation de ressources des métropoles** : réhabiliter et adapter plutôt que rénover et démolir ; diversifier les modes constructifs, privilégier la préfabrication et utiliser des matériaux moins énergivores ; favoriser les courtes distances et la performance énergétique des bâtiments ; exploiter au mieux la « mine urbaine » en réemployant les matériaux, par un début d'économie circulaire ;
- **Revaloriser les villes de petite taille en déclin actuellement (maille de 15 000 à 45 000 habitants), dans un fonctionnement en réseau** : moins gourmandes en ressources rares, elles peuvent accueillir des populations et des emplois plus résilients, une agriculture de proximité repensée selon des modèles agro-écologiques, la petite fabrication (PME) intégrant de l'innovation mais aussi des savoir-faire à reconquérir, des auto-entrepreneurs en réseau, et ce dans un parc habitable à revitaliser ; une économie plutôt sociale, et souvent solidaire ;
- **Revaloriser la convivialité urbaine et la qualité des loisirs en ville** face au tourisme de masse ou de court séjour par avion, de nouvelles formes de convivialité urbaine s'inventent (balades urbaines, jardins partagés, fab labs et repair cafés, AMAP, disco soupes, brocantes...) qui démontrent l'attente citadine d'une revitalisation des liens sociaux et de la vie culturelle, autour de chez soi, réduisant le besoin d'évasion ;

Dans l'architecture et le bâtiment

On construit trop : on estime qu'il y a en 2015 plus de 5 millions de m² de bureaux vides en Ile de France. Les projets autour du Grand Paris express en prévoient 10 millions supplémentaires... La défiscalisation favorise la construction de logements sans locataires, dans des régions en déclin, des villes sans étudiants ou pour le tourisme saisonnier. Les PLU (plans locaux d'urbanisme) continuent à imposer des parkings individualisés dans chaque opération, générateurs de coûts exponentiels, de volumes énormes de déblais, de difficultés de gestion et de reconversion de ces sous-sols.

La construction en béton banché domine la construction du logement en France depuis 50 ans. Façade porteuse et isolation par l'intérieur constituent une spécificité française à l'échelle européenne.

Pourtant les constructions en poteaux-poutres ou dalles-poteaux basées sur l'assemblage permettraient d'économiser de la matière et de diversifier les matériaux. Elles sont incontestablement plus adaptées à la déconstruction et au réemploi, à l'adaptabilité du cadre bâti.

La réhabilitation Gisement d'économie et d'innovations

La réhabilitation présente plusieurs avantages décisifs, que l'on pourrait appeler le « triple effet ». D'abord, en évitant de nombreuses démolitions, elle évite la production de déchets de chantier, pour partie pollués, dangereux ou difficiles à recycler (amiante). Ensuite, c'est logiquement là que se situe le gisement d'économie d'énergie dans le bâti.

Enfin appelant de multiples innovations de procédés en surélévation, en densification, en changement partiel ou total d'usage, en combinatoire de programmes et mixité des fonctions, la réhabilitation intelligente permet d'inventer une ville et une architecture plus résilientes, donc adaptée aux enjeux de demain.

Exemple, la réhabilitation par façades isolées en préfabrication bois, à partir de relevés tridimensionnels a d'importants avantages : rapidité, précision, faibles nuisances, peu d'intervention en milieu occupé, faible stockage sur chantier. Les métiers y sont plus qualifiés, appuyés par une démarche qualité intégrée au procédé industriel, qui peut revitaliser la filière bâtiment tous corps d'état confondus. (Voir le programme européen TES Energy Facade).

Dans le secteur tertiaire, on peut facilement atteindre un facteur 10 d'économie d'énergie. En intégrant dans les calculs les équipements et cycles d'usages intérieurs, on peut éviter la climatisation. Les immeubles de bureaux, souvent construits en poteaux-poutres, se convertissent bien en résidentiel mixte.

La construction neuve : viser la simplicité efficace, l'économie des ressources et l'adaptabilité

Les différentes réglementations thermiques de 1974 à la RT2012 n'ont que très peu fait évoluer le modèle constructif français du logement en façades BA¹ et isolation par l'intérieur, ventilation simple flux. Les tendances observées sont au suréquipement des bâtiments en systèmes énergétiques plus ou moins complexes et lourds en entretien maintenance. La high-tech s'installe dans les bâtiments (systèmes intelligents de régulation, domotique², gestion technique des bâtiments (GTB) ; matériaux à changement de phase ; vitrages à contrôle solaire, bétons transparents, etc.) dans une course en avant entre fabricants pour se démarquer. Mais sont-ils efficaces, robustes et durables ?

Pour leur fabrication, ces produits nécessitent des métaux et matières rares. Oui à la domotique à condition qu'elle rende un service à haute valeur ajoutée : piloter un by-pass d'échangeur de ventilation double-flux pour rafraîchir un bâtiment oui ; commander à distance la porte du garage pour

¹ BA : béton armé

² : technologies de l'information et automatismes appliqués aux bâtiments

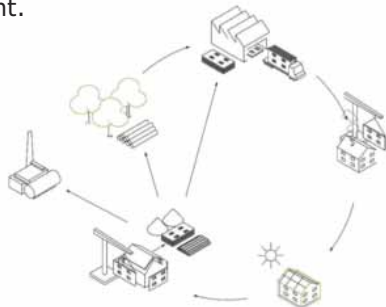
elle est pourtant éligible au crédit d'impôt. Inversement la GTB peut jouer un rôle réellement efficace dans le tertiaire ; dans le logement elle s'avère souvent trop complexe, inexploitable. Un bâtiment low-tech réussi devra viser la sobriété en équipements, tout en accompagnant l'utilisateur pour s'approprier les habitudes économes en énergie.

Pour réduire la pression sur les ressources, concevoir durablement demande d'investir prioritairement sur une enveloppe performante, qui réduit les besoins de puissance et les systèmes compensatoires. Récupérateurs de chaleur sur les chutes d'évacuation d'eau grises, échangeurs métalliques dans une ventilation double-flux deviennent des systèmes simples assurant un confort d'hiver et d'été à moindre frais. A Montreuil, un bâtiment livré de 17 logements collectifs à R+5 tout bois et passif, est équipé d'une simple chaudière de maison individuelle pour chauffer et produire l'eau chaude sanitaire des 17 appartements et ce, sans recours aux énergies renouvelables ! Cette opération, sans parking souterrain imposé, est compétitive en termes de prix et de loyers. Un faible coût de maintenance rejoint l'enjeu bas carbone.

Conclusion

Freiner et inverser notre rapport aux ressources devenues rares demandera une génération. Il ne s'agit plus d'optimiser et réduire de 40% nos consommations, mais bien de diviser par 4 notre gaspillage. Nous y voyons cinq défis mobilisateurs, en urbanisme comme en architecture :

- recycler les villes et le bâti existants, par un nouveau design et des services mutualisés, plus que par des infrastructures lourdes
- donner la priorité au watt non consommé, et au déchet non produit
- inverser les logiques d'obsolescence par celle de la robustesse et de la réparabilité
- rendre la ville conviviale pour tous, en reconquérant les espaces publics et collectifs de la vie locale par rapport aux fonctions purement circulatoires
- innover radicalement en matière de mutualisation de ressources et d'économie à l'échelle de l'îlot urbain et pas seulement à celle du bâtiment.



***La ville redevient
un écosystème de vie***

Agriculture : utiliser la nature comme réservoir de productivité



Charles (Sacha) Guégan, (Ecole Polytechnique 1993) passe quinze années dans l'industrie à des postes de responsable de production puis en charge de la définition de stratégies industrielles (Michelin, Vallourec, Alstom). Il se forme ensuite au maraîchage biologique et à la permaculture, puis rejoint la ferme biologique du Bec Hellouin en 2013. Il y coordonne les formations et le programme de recherche mené conjointement avec l'INRA et AgroParisTech. Depuis 2015, il accompagne également des particuliers et des collectivités dans la conception et l'aménagement de sites en permaculture.

De l'agriculture du pétrole...

L'agriculture « moderne », qui a pris son essor après-guerre, a profondément bouleversé les campagnes et les modes de vie paysans. Elle repose sur une forte mécanisation et le recours massif aux produits chimiques (fertilisants, pesticides, fongicides, désherbants,...) et se distingue donc par sa forte dépendance aux énergies fossiles et aux minerais. Cette dépendance commence avec la fabrication des engins agricoles, continue avec leur transport sur les lieux de production, se poursuit avec l'utilisation de carburant. Il ne faut pas non plus oublier l'approvisionnement en semences, les opérations de fertilisation et de traitement avec des produits chimiques dont la synthèse est très énergivore. Après récolte, les produits sont ensuite transportés sur de longues distances, en étant parfois transformés avant de parvenir au consommateur final.

Bref : l'agriculture « moderne » n'est possible que grâce à la disponibilité à grande échelle de ressources non renouvelables. Ceci pose bien sûr question, car s'il est une chose que tout un chacun doit faire chaque jour pour vivre, c'est bien sûr s'alimenter !

A cette problématique s'en ajoutent d'autres tout aussi fondamentales, également liées à cette forme d'agriculture : la destruction du support même de la production de nourriture, le sol ; les pollutions et leur impact sur la santé publique ; la perte de biodiversité ; la contribution au réchauffement climatique ; l'uniformisation des paysages ; le dépeuplement des campagnes et le coût social qui en découle ; etc.

...à l'agriculture du soleil

Dans les années 70, la prise de conscience de ces enjeux – voire de ces impasses – a conduit deux Australiens à bâtir un système conceptuel baptisé « Permaculture » (mot valise provenant de l'anglais Permanent culture). Bill Mollison et David Holmgren ont formulé des principes visant à créer, par une conception réfléchie et efficace, des écosystèmes en y intégrant totalement les humains. La permaculture vise à reproduire la

diversité, la stabilité et la résilience des écosystèmes naturels, et ce de telle façon que l'énergie à investir pour le maintien des systèmes créés soit décroissante au cours du temps.

C'est dans ce cadre que Charles et Perrine Hervé-Gruyer ont créé la ferme biologique du Bec Hellouin¹, en Normandie. En s'inspirant des concepts développés par Mollison et Holmgren, en les enrichissant du savoir-faire des maraîchers parisiens du 19^{ème} siècle² et des connaissances scientifiques actuelles, ils ont exploré une forme d'agriculture se caractérisant par la faible dépendance aux ressources non renouvelables, la mise en valeur des cycles naturels et la culture sur petite surface en atteignant de hauts niveaux de productivité. Rapidement, ces pratiques ont attiré l'attention de l'INRA et d'AgroParisTech, donnant lieu à un premier programme de recherche sur 3 ans (« Maraîchage biologique permaculturel et performance économique »), programme qui s'est conclu en 2015³.

La première caractéristique fondamentale du système développé au Bec Hellouin est la très faible mécanisation : l'essentiel du travail se fait à la main. Afin que les coûts induits ne déstabilisent pas l'économie de la ferme, il a fallu complètement repenser la place du travail manuel. Pour cela, la main humaine a été transformée en atout, car son agilité la rend capable de bien des opérations impossibles avec une machine. C'est ainsi que plusieurs techniques mises en œuvre visent à intensifier l'utilisation de la surface cultivée (exemple : densification et association des légumes, soins accrus aux cultures, incompatibles avec la mécanisation), tout en permettant de capter plus de rayonnement solaire (ex : couverture du sol par les légumes à port bas, associés à des légumes croissant en hauteur) et parfois de réduire la quantité de travail (ex : réduction du temps de désherbage et de la surface à préparer avant implantation).

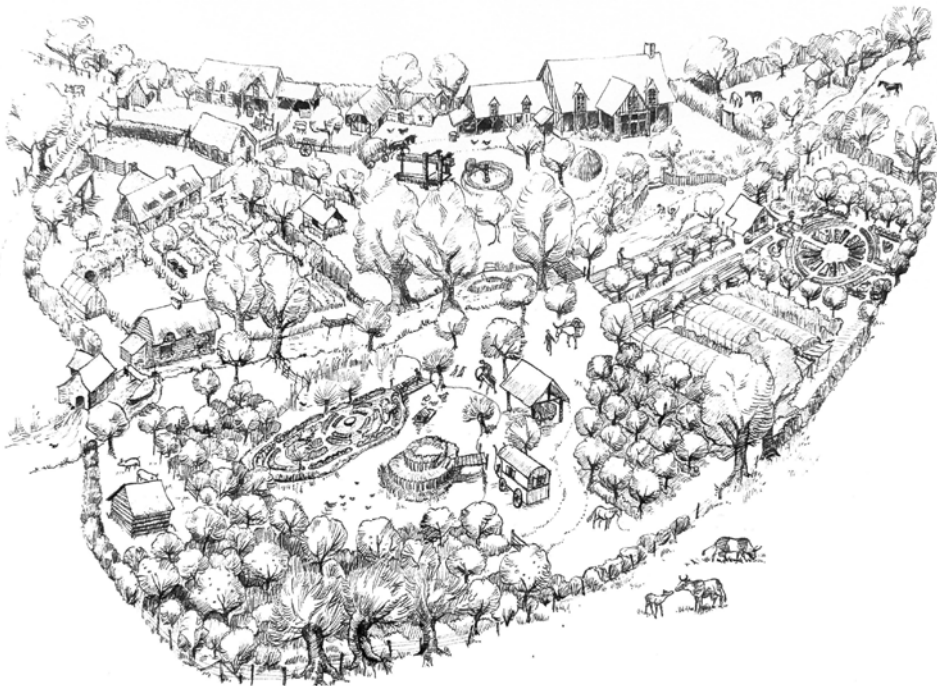
Dans la même logique, les outils ont été adaptés aux pratiques. Pour cela, l'équipe de la ferme a recherché dans les brocantes des outils spécifiques encore courants dans les campagnes il y a 50 ans, en a découvert certains créés récemment par d'autres maraîchers et en a conçu d'autres, fabriqués sur place ou par un artisan local. Autant d'outils sur mesure, simples, robustes et facilement réparables si le besoin s'en faisait sentir un jour. Enfin, il ne faut pas oublier un autre point essentiel : les cultures maraîchères se comprennent comme faisant partie d'un tout, elles sont en interaction étroite avec leur environnement. Les services écosystémiques ont donc une place majeure dans la conception et dans l'aménagement de la ferme. Ainsi, et pour ne donner qu'un exemple, de nombreux écosystèmes ont été créés (mares, haies, arbres, ...) et sont étroitement imbriqués avec et dans les parcelles de légumes. Leur emplacement et leur nature ont été mûrement réfléchis, afin de remplir efficacement plusieurs fonctions : abri pour les prédateurs des ravageurs, source de nutriments, création de microclimats, ... Autant de forces et d'alliés naturels, qu'il est nécessaire de comprendre pour tenter d'orienter leur action au mieux !

Loin d'être un retour à la bougie, le système de production développé est donc d'une grande complexité ; les énergies fossiles y sont remplacées par l'énergie solaire et par l'intelligence humaine, qui doit comprendre les cycles de la Nature, observer le site avec attention, afin de concevoir et d'aménager le paysage en s'insérant harmonieusement dans l'écosystème.

De plus, et c'est là un des résultats majeurs du programme de recherche mené au Bec Hellouin : écologie et économie ne sont pas antagonistes. Il est au contraire possible d'atteindre une performance économique élevée sur une toute petite surface (pour 1000 m² cultivés, la valeur récoltée a été dès la première année de 32 000 €, et de 55 000 € la troisième année), et ce en travaillant à la main, pour une charge de travail comparable à celle des maraîchers mécanisés, le tout dans un environnement magnifique, abritant une faune sauvage très diversifiée.

C'est bien là une piste vers une agriculture résiliente, très peu dépendante des ressources non renouvelables, et dont les externalités positives sont nombreuses. Citons-en quelques-unes :

La Ferme du Bec Hellouin, dessinée par Charles-Hervé Gruyer



¹ www.fermedubec.com

² Qui se souvient que dans la seconde moitié du XIX^e siècle, les maraîchers parisiens fournissaient totalement la capitale et exportaient jusqu'en Grande-Bretagne ?

³ Rapports disponibles sur <http://www.fermedubec.com/publications.aspx>

C'est bien là une piste vers une agriculture résiliente, très peu dépendante des ressources non renouvelables, et dont les externalités positives sont nombreuses. Citons-en quelques-unes :

- création d'emplois riches de sens, dans des micro-fermes qui redynamisent les campagnes ou rapprochent la nature de la ville (agriculture urbaine ou péri-urbaine), tout en améliorant la résilience alimentaire des territoires ;
- installation des porteurs de projet facilitée par les investissements moindres ;
- production d'une nourriture saine et savoureuse ;
- libération d'espace pour d'autres usages, comme la création d'écosystèmes disparus ou en danger ;
- impact positif sur la biodiversité et la séquestration de carbone.

Cette forme d'agriculture différente rencontre beaucoup d'écho, nombreux sont les porteurs de projet à vouloir s'installer en s'en inspirant. Il s'agit là d'une transition double : transition pour les personnes, qui sont souvent en reconversion professionnelle ; transition pour le monde agricole. Cette transition, qui semble répondre à une demande sociétale, a besoin d'être accompagnée, et l'Etat a son rôle à jouer : il peut orienter la recherche, faire évoluer l'enseignement agricole et technique, adapter la réglementation, aider les agriculteurs désireux de faire évoluer leurs pratiques.

Aller vers des systèmes à la fois plus humains, plus naturels et plus résilients, aller de l'agriculture du pétrole à l'agriculture du Soleil, quel beau projet !

Santé et hygiène : La high tech est-elle la meilleure voie vers plus de bien-être ?



Marie Aichagui (*Ecole Centrale Paris 2004, KTH 1999*) est dirigeante de la société *A Global Vision* www.agvonline.org, propriétaire de la marque *BeautyWaps* www.beauty-waps.org et de la société suédoise *BeautyWaps Scandinavia AB*. Après 7 ans dans l'industrie allemande (*Airbus Group, The Linde Group, Hanwha QCells*) elle a décidé de se consacrer entièrement à des activités dédiées au développement durable.

Des ressources considérables, de recherche et développement, de production, de marketing, sont déployées dans les domaines de l'hygiène et de la santé, pour mettre au point des produits complexes et innovants. Les entreprises du secteur promettent non seulement une meilleure santé mais aussi plus de bien-être. Pourtant, certains ingrédients des cosmétiques et produits d'hygiène ont commencé à être fortement critiqués pour leurs effets secondaires indésirables, les risques pour la santé ou la pollution engendrée : micro billes de plastique dans les produits de gommage ou les dentifrices¹, parabène dans les produits d'hygiène, nanoparticules dans les crèmes solaires... et même résidus d'herbicides – du glyphosate, qu'on retrouve dans 85% des protections périodiques², à cause du Roundup (produit par la multinationale Monsanto) utilisé pour la culture du coton !

Une démarche scientifique exemplaire qui permet l'émergence des meilleures solutions

Dans de nombreux domaines émergent ainsi des solutions plus naturelles, traditionnelles donc éprouvées, et plus simples, que l'on pourrait qualifier de "low tech", en tant que complément et même comme substitut de la high tech. Un exemple révélateur est le Prix Nobel en Médecine de 2015 : la chercheuse chinoise Youyou Tu s'est basée sur ses connaissances en Médecine Traditionnelle Chinoise pour identifier l'artémisinine, une substance dont l'extraction a permis de développer un médicament extrêmement efficace contre le paludisme. L'originalité de sa démarche a été de s'appuyer sur les connaissances millénaires et pratiques ancestrales, qu'elle a combinées avec des techniques modernes. C'est la démarche intellectuelle d'examiner sur un pied d'égalité et sans préjugés l'ancien et le nouveau qui a permis l'émergence de cette solution.

¹ « Cosmétiques : des microbilles de plastique polluent l'océan », Marielle Court, Le Figaro, 11/01/2013

² « 85% des tampons et serviettes hygiéniques contiendraient du glyphosate », Patrick Bèle, Le Figaro, 29/10/2015

« Less is more » : la multiplication des scandales sanitaires poussent les consommateurs à choisir des produits avec un nombre réduit de composants

L'Organisation Mondiale de la Santé prévoit que le nombre de nouveaux cas de cancer augmentera de 70% dans les deux décennies à venir et parmi les femmes, un des types de cancer les plus fréquents est le cancer du col de l'utérus³. Les études récentes montrant la présence de résidus de pesticides et autres agents, potentiellement cancérigènes et susceptibles d'agir en perturbateurs endocriniens, dans les protections périodiques féminines, serviettes comme tampons, et ce même parmi certaines marques dites « bio »⁴ inquiètent de nombreuses femmes quant aux conséquences sur leur santé de l'utilisation de ces produits. Il vaut mieux prévenir que guérir : on observe une demande croissante d'alternatives aux protections périodiques conventionnelles, qui permettent aux femmes d'éviter de s'exposer à des produits dont la composition est cachée par les fabricants, alors qu'ils sont potentiellement nocifs.

La santé et l'écologie mènent la voie, avec l'appui du numérique

Dans ce domaine comme dans bien d'autres, l'innovation devance les études et il n'a pas fallu attendre la publication de résultats d'analyses démontrant la toxicité des protections périodiques jetables pour que des solutions émergent. On voit ainsi apparaître sur le marché des protections périodiques réutilisables, sous forme de coupes menstruelles (protection interne en forme de récipient en silicone pharmaceutique) ou de serviettes hygiéniques lavables (protection externe en forme de serviettes en coton absorbant et textile polaire), qui présentent l'avantage d'éviter irritations et démangeaisons à leurs utilisatrices.

Les serviettes réutilisables ne sont pas nouvelles : nos grand-mères utilisaient des tissus qu'elles lavaient. Mais le mécanisme d'attache était compliqué et contraignant, et il fallait consacrer du temps à la lessive. L'arrivée des serviettes jetables a été vécue comme une émancipation. Mais depuis la machine à laver s'est généralisée, et les inconvénients ont été éliminés : sous leur forme moderne, les serviettes assurent absorption, confort, ergonomie, praticité d'attache et résistance à l'usage. Elles existent déjà depuis une vingtaine d'années, mais ont dû attendre que le monde évolue pour avoir l'attention qu'elles méritent. D'une part l'orientation santé est bénéfique à ces produits, d'autre part une volonté de plus en plus répandue de se comporter de manière écologiquement responsable joue en faveur des produits réutilisables qui permettent de réduire de plus de 90% les déchets liés aux règles : une utilisatrice de serviettes hygiéniques conventionnelles jettera plus de 300 kg de protections au cours de sa vie, alors qu'une utilisatrice de serviettes réutilisables ne générera qu'à peine 6 kg de déchets menstruels.

³ Fact sheet N°297 du «World Health Organization», février 2015

⁴ « Des résidus "potentiellement toxiques" retrouvés dans des tampons et serviettes hygiéniques », Le Monde, 24/02/2016

Le développement du numérique permet à ces solutions de se démocratiser au lieu de rester réservées à un nombre restreint de militantes d'avant-garde. Les réseaux sociaux changent la donne et remettent au goût du jour les réunions de vente à domicile : des vidéos décalées prônant les avantages des protections périodiques réutilisables font le « buzz », des bloggeuses vedettes s'approprient le sujet des règles sur un ton ludique en faisant tomber les tabous. Et les boutiques en ligne permettent de trouver le produit adapté bien plus facilement que dans la grande distribution ou en pharmacie.



Exemples de protections périodiques réutilisables

Des nouvelles solutions low tech permettent de libérer les femmes dans les pays en voie de développement

Dans certains pays, les règles représentent un véritable obstacle pour l'activité des femmes. L'exemple du Kenya est flagrant. 60% des femmes n'ont pas accès aux protections périodiques et sont donc contraintes au choix suivant : rester à la maison pendant ces jours, ou improviser des protections avec des matériaux inappropriés par leur nocivité (comme les mousses de matelas) ou par leur inefficacité (comme les feuilles). De nombreuses adolescentes ratent ainsi jusqu'à 20% des cours à cause de leurs règles.

Une étude pour mesurer l'impact de la généralisation de serviettes réutilisables sur la scolarisation des filles a constaté d'une part une réduction considérable de l'absentéisme et d'autre part une amélioration de la concentration des écolières. Un projet⁵ est actuellement en cours pour transférer la technologie, innovante mais low tech, de la fabrication des serviettes réutilisables, afin de monter une production locale. Ceci

⁵ étude et projet menés par la marque BeautyWaps

permettra à un grand nombre de filles d'aller à l'école tous les jours du mois, comme les garçons. Or les sociétés dans lesquelles les femmes jouent un rôle actif sont précisément celles qui ont de meilleures chances de se développer de manière durable. La mise au point de serviettes réutilisables s'avère alors dans ces pays une innovation disruptive qui permet pour la première fois aux femmes de ne plus vivre leur réalité physiologique comme un handicap.

Conclusion

La santé et l'hygiène touchent à notre intimité, on ne saurait donc y être indifférent. Depuis toujours les consommateurs demandent la meilleure qualité et les entreprises ont tenté de persuader les clients que high tech est synonyme de mieux. Ce paradigme est actuellement remis en cause et des solutions réellement efficaces émergent, qui s'éloignent pourtant du tout technologique en puisant dans le meilleur des pratiques ancestrales et les moyens modernes adaptés pour créer la solution optimale au problème posé. On voit ainsi de plus en plus de parents choisir des couches lavables pour leur bébé, les rayons cosmétiques se remplissent d'huiles et gels végétaux purs pour les nombreuses femmes qui préfèrent désormais préparer elles-mêmes leurs cosmétiques, dont les recettes foisonnent sur la Toile, le savon artisanal reconquière des parts de marché... Les changements de la société amènent de nouveaux entrepreneurs à proposer des solutions inattendues. Quel prochain grand défi de l'humanité sera résolu par cette démarche sage et ingénieuse ?

L'écoconception logicielle pour un numérique durable



Thierry Leboucq est dirigeant-fondateur de l'éditeur logiciel Greenspector, Président du Green Lab Center, cluster de l'innovation Green IT, vice-président du Green Code Lab, association nationale de l'éco-conception des logiciels

Il est co-auteur de la publication scientifique : **Characterization of the energy consumption of websites: Impact of website implementation on resource consumption** ainsi que co-auteur du livre **Green Pattern**.

www.greencodelab.fr/book

Le numérique explose ! Nous consommons de plus en plus de services et d'informations via des formats numériques à tout moment dans tous lieux. Ces services et contenus sont de plus en plus nombreux et volumineux. La consommation de ressources qui résulte de cette omniprésence explose aussi dans les datacenters, et de manière plus insidieuse et encore plus conséquente dans tous nos matériels déployés comme les ordinateurs, tablettes, smartphones, box, objets connectés, ...

L'université de Dresde a ainsi estimé qu'en 2030, l'internet au sens large consommerait autant d'électricité que toute l'humanité en 2008 !

L'évolution la plus emblématique du numérique est à la fois la masse de données que nous produisons et conservons à chaque instant, mais également la miniaturisation des matériels permettant l'accès aux informations et services correspondants. Pour cela, nous avons continuellement besoin d'embarquer de plus en plus d'intelligence dans un matériel de plus en plus petit. Une telle évolution n'est pas soutenable, et va ainsi nécessiter de nouvelles optimisations : les composants, les batteries, le refroidissement dans les datacenters,... mais aussi dorénavant le logiciel qu'on y insère ! Car l'entropie naturelle du logiciel existe bel et bien. Et on parle désormais d'obésiciel¹ !

En effet, aujourd'hui on ne forme plus nos développeurs à faire attention à la ressource utilisée ; ni à l'école, ni en entreprise. In fine, on choisit toujours d'ajouter si nécessaire de la puissance pour combler cette lacune d'efficacité logicielle. Mais cet ajout se fait au détriment des coûts, de l'autonomie, de l'écologie et finalement du bon sens.

En définitive, c'est une forme de relocalisation du numérique : investir dans l'efficacité logicielle localement, c'est réduire les coûts du matériel produit au bout du monde dans des conditions sociales et sanitaires pas toujours acceptables par ailleurs.

¹ En anglais : Bloatware

Ainsi, la première intuition que nous avons eue, en tant qu'entreprise engagée dans un numérique plus vertueux, s'est révélée exacte quand nous l'avons démontrée dans le cadre du projet Code Vert. Ce projet, au bout de 30 mois, nous a permis de valider à la fois les gains liés à une meilleure utilisation des instructions de codes dans un programme informatique, des Green Patterns de code, ceci en même temps que nous avons pu commencer à préciser les contours d'une solution Greenspector, première solution du marché pouvant accompagner le développeur dans sa quête d'écoconception du logiciel.

Quel intérêt pour une entreprise à s'engager dans cette voix de la sobriété logicielle ? Les exemples commencent aujourd'hui à se multiplier, et bientôt l'écoconception numérique aura vocation à être rangée dans les bonnes habitudes de travail de toute équipe de développement. Ainsi, Facebook aurait-il trouvé un modèle économique viable, il y a quelques années, s'il n'avait pas divisé par 2 sa consommation électrique, grâce à la mise en œuvre d'une stratégie d'optimisation logicielle (Projet Hip-hop for PHP) lui évitant de construire un nouveau datacenter ?

Dans un monde où il est aujourd'hui inenvisageable (qui sait, cela changera peut-être un jour) de modérer à bon escient l'usage de nos mobiles, cette démarche répond finalement à une demande pressante du marché du consommateur final que nous sommes : l'autonomie de nos matériels mobiles, embarqués, connectés que nous emmenons partout ! Ce critère est en effet devenu le premier critère de choix du smartphone depuis fin 2014 (étude IDC). Ici, pas question de gagner de l'argent mais de gagner en mobilité, en productivité, en utilisabilité, en expérience utilisateur. L'optimisation du logiciel devient alors un rouage essentiel dans cette quête d'autonomie pour les constructeurs pour prendre des parts de marché. Jusqu'à maintenant, le focus était plutôt sur les datacenters, où l'on s'emploie depuis longtemps à trouver des solutions pour refroidir moins cher : délocalisation dans des zones tempérées ou froides, urbanisation élaborée des salles machines, récupération de chaleur, ... rappelons que le watt qui ne sera pas produit en chaleur ne sera pas à refroidir. Pourtant, le travail sur un logiciel moins dispendieux ne représentera que 20 % d'un retour sur investissement par l'optimisation logicielle pour les coûts énergétiques, la plus grosse partie se situe sur les ressources économisées (machines, places, gestion, ...) hors énergie et peut représenter plusieurs centaines de milliers d'euros par an pour les gros datacenters.

D'autres gains sont encore plus intéressants dans le domaine des objets connectés déployés, afin de réduire la fréquence de maintenance et augmenter la longévité d'un matériel (parfois gourmand en ressources rares) déployé avec un niveau de service supérieur. Au final, quelle que soit la motivation, on visera finalement un service au moins aussi performant pour son utilisateur pour un coût d'exploitation moindre, tout en limitant le stress lié aux besoins en énergie et en ressources pas toujours renouvelables.

Pour ceux qui n'ont pas de gains évidents visibles ou conséquents en regard des coûts potentiels de mise en œuvre de cette écoconception numérique, ils peuvent désormais se conformer à un référentiel de bonnes pratiques Green, aujourd'hui pour le web pour le moment (Green Code Label) et demain sur les applications mobiles et backoffice.

Comment avons-nous réussi à établir les bases d'une bonne pratique d'efficacité de conception et de développement ? Dans le cadre du projet WebEnergyarchive, l'association Green Code Lab a mesuré plus de 700 sites web et observer qu'il y avait une corrélation de la consommation de ressources avec la complexité (scripts, nombre de requêtes incluses dans la page). Elle a aussi effectué d'autres observations, qui ont notamment permis de montrer que la consommation moyenne d'une page dans un onglet minimisé, c'est à dire non affiché à l'écran et pas en interaction avec lui, représente 1 Watt de puissance appelée qui ne sert à rien en moyenne sur le poste qui n'affiche pas cette page (consommation des requêtes envoyées aux serveurs et alimentant le trafic dans le réseau non incluse !).

Eviter une telle consommation inutile peut pourtant se faire facilement, en demandant au développeur de prévoir une extinction des traitements quand l'onglet du navigateur n'est pas visualisé par l'utilisateur.

Les entreprises commencent ainsi timidement à intégrer cette démarche dans leur ingénierie logicielle avec des gains intéressants qu'elles avaient oubliés. Gagner 30 % sur les besoins mémoire sur 2 applications dans un datacenter peut générer des centaines de milliers d'euros de gains d'exploitation sur l'année. La forte corrélation entre efficacité et performance implique aujourd'hui une réelle valeur pour les éditeurs web pour qui le temps d'affichage d'une page sur un support non maîtrisé est un atout essentiel pour générer du trafic et donc de la publicité, des achats.

Mais rêvons un peu. Ne serait-il pas possible de pousser la logique plus loin, en essayant de « sauver la planète » du danger que le numérique dispendieux non contrôlé peut lui faire courir ? De quoi redonner du sens au travail du développeur, qui peut ainsi trouver enfin un moyen d'agir et d'œuvrer concrètement pour limiter l'impact écologique de sa production, via son travail au quotidien. Un moyen de revaloriser le "pisseur" de code ?

Certes, il est vrai que revoir tout son patrimoine applicatif pour réaliser une rétro-éco-conception n'a pas toujours de sens économique à court terme, mais l'histoire numérique ne fait que commencer, et les chapitres numériques que nous allons désormais écrire seront bien plus nombreux que les chapitres déjà écrits. Parions qu'ils n'auront d'autre choix que d'intégrer, pour être "compétitifs" dans un monde aux ressources limitées, cette nouvelle dimension de sobriété chez les donneurs d'ordre et chez les maîtres d'œuvre numériques.

Ressources éco-conception logicielle :

www.greencodelab.fr, www.greencode-label.org, www.webenergyarchive.com

Enjeux énergétiques : le défi du stockage relevé par la thermique



Hervé Lesueur, docteur en physique des plasmas, option énergétique, au BRGM depuis les années 90, est avant tout spécialisé dans la valorisation des énergies fatales² et renouvelables (Incinération, géothermie, réseaux d'énergie ...). Comme marqueurs de sa carrière on peut citer la plate-forme expérimentale sur les échangeurs géothermique du BRGM, qui a été mise en service en présence du ministre de l'Environnement à l'occasion de l'annonce des mesures du Grenelle, et le projet ANR-Géostocal produisant les clés économiques du stockage saisonnier dans un réservoir géothermique, sous l'agglomération parisienne, des excédents thermiques d'usines d'incinération.

Dans la majorité des pays développés, le confort thermique dans les bâtiments résidentiels et tertiaires représente aujourd'hui un enjeu énergétique conséquent. Ainsi, en France, en incluant les climatisations, il représente 35 à 40% de la demande finale, auquel il convient d'ajouter l'eau chaude sanitaire (ECS), de l'ordre de 6%. En dépit de cette proportion importante de notre énergie consacrée au chaud et au froid, l'attention est aujourd'hui surtout portée sur la production et le stockage d'électricité.

Ne nous focalisons pas sur l'électron

Pourtant, le marché des systèmes thermodynamiques (ex : pompes à chaleur), à même de minimiser les consommations d'énergie primaire, mériterait d'être développé, tout comme celui du renouvelable thermique (solaire et géothermie en particulier).

Pour ces deux filières, les composantes techniques, simples et robustes, sans utilisation de ressources rares, sont validées de longue date : la France a même fait partie des pionniers, par exemple avec l'installation héliogéothermique d'Aulnay-sous-Bois il y a environ 40 ans, malheureusement rapidement démantelée pour laisser la place à une chaufferie à gaz plus dans l'air du temps.

A ce jour, on ne compte plus les démonstrateurs et les travaux scientifiques qui prouvent que la combinaison de ressources renouvelables procure des solutions de grande efficacité, et ceci à une échelle locale.

Exemple : l'énergie solaire est abondante mais souffre d'intermittence et de saisonnalité; en revanche une ressource géothermique est toujours disponible mais se régénère lentement.

Une combinaison de ces deux ressources thermiques assure ainsi abondance et disponibilité, localement, sans impacter le voisinage.

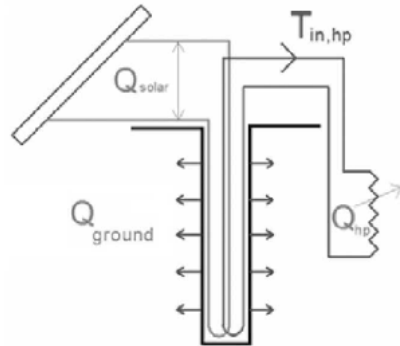
² énergies fatales : énergies perdues si on ne les utilise pas au moment où elles sont produites

Un peu d'ingénierie et tout devient possible

Pour un tel exercice, le rôle de l'ingénieur est prépondérant. En effet, « localement » ne signifie pas laisser chaque individu mettre en place son petit système – le faisant migrer du statut de « consommateur d'énergies » à celui de « gestionnaire d'énergies ». Avec une utilisation scientifique des bonnes technologies, il est possible d'optimiser les aménagements énergétiques sur le long terme tout en ménageant de la place à d'éventuelles innovations futures, dont on ignore encore tout ou presque, par exemple pour ce qui est des réseaux intelligents d'énergie thermique et de la répartition de leurs capacités de stockage tampon (permettant d'optimiser l'utilisation de stockages thermiques distribués).

Une telle combinaison solaire thermique + stockage thermique dans le sol est-elle une utopie pour les espaces urbains denses que nous connaissons ? Rien n'est moins sûr. Pour cela, examinons de plus près quelques ordres de grandeurs importants pour le dimensionnement, en commençant par les besoins thermiques d'un habitant, supposés couverts par un système thermodynamique échangeant avec le sous-sol.

L'énergie thermique finale nécessaire peut être estimée pour un habitant à $60 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{an}$, soit $1800 \text{ kWh} / \text{an}$ pour les 30 m^2 occupés en moyenne par cet habitant, un habitant, se répartissant en $1500 \text{ kWh} / \text{an}$ pour le chaud, (moitié pour l'eau chaude (ECS, linge, vaisselle...) et moitié pour le chauffage), et $300 \text{ kWh} / \text{an}$ pour le rafraîchissement direct.



En prenant une machinerie thermodynamique avec un coefficient de performance de 4, alors un habitant pourra, pour les 1500 kWh de chaud, puiser annuellement dans le sous-sol $125 \text{ kWh} / \text{an}$, le reste, $375 \text{ kWh} / \text{an}$, provenant de l'électricité consommée par la machinerie. Pour le rafraîchissement direct, le même habitant rejettera $300 \text{ kWh} / \text{an}$. Il convient donc de gérer un déséquilibre entre l'été et l'hiver d'environ $825 \text{ kWh} / \text{an} / \text{habitant}$.

Un tel déséquilibre peut être facilement compensé par du solaire thermique : il faudra ainsi moins de $1 \text{ m}^2 / \text{habitant}$ pour capter une telle énergie, cela en tenant compte des pertes.

De même, comme l'énergie solaire incidente est rarement en phase avec les demandes et doit donc transiter par le sous-sol, il est important d'estimer le volume de roches auquel doit avoir accès un habitant. On prendra pour cela une hypothèse pessimiste, voulant que le stock thermique soit disponible en début de saison hivernale pour couvrir 100%

du chauffage et 50% de l'ECS annuels. En prenant une capacité thermique volumique des roches de l'ordre de $0.64 \text{ kWh} / \text{m}^3 \cdot \text{K}$ et une amplitude thermique de 10°C ($\pm 5^\circ\text{C}$ autour d'une valeur moyenne se situant vers 15°C), on obtient alors un volume de roche de $132 \text{ m}^3 / \text{habitant}$.

Que représente un tel volume à l'échelle d'une agglomération ? Pour Paris intramuros, dont la superficie est de $105,4 \text{ km}^2$ pour 2,3 millions d'habitants, cela représenterait une épaisseur de roches très raisonnable de moins de 3 m sous toute la ville, bien inférieure aux profondeurs des fondations et des différents réseaux urbains. De même, le m^2 de panneau solaire thermique par habitant mentionné précédemment ne représenterait que 2,2% de la superficie de la ville. L'utilisation de telles solutions est donc crédible, même en grande agglomération².

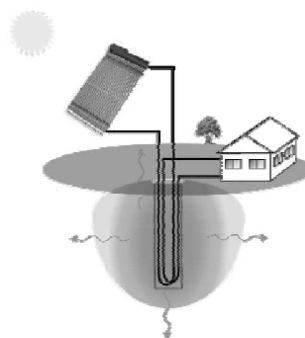
Des techniques de stockage variées que l'on maîtrise

Les technologies disponibles permettent au moins quatre grandes solutions pour emmagasiner de l'énergie thermique dans le sous-sol (UTES : underground thermal energy storage).

Deux de ces solutions sont des réservoirs enterrés PTES et TTES (pit storage, tank storage). Les deux autres sont des solutions géothermiques : ATES (aquifer storage) et BTES (borehole storage). Cette dernière connue en France sous le nom de « champ de sondes géothermiques », correspond à un ensemble de forages de 140 à 200 mm de diamètre équipés d'une boucle de circulation d'eau fonctionnant en circuit fermé pour échanger de la chaleur avec les roches environnantes. Les forages sont typiquement espacés de 3 m à 8 m les uns des autres et leur profondeur peut atteindre 200 m.

Si on choisissait des implantations de stockage de type BTES sous Paris, elles n'occuperaient que 1,5% de la superficie de la ville – ce qui est tout à fait envisageable lorsque l'on sait que les champs de sondes géothermiques peuvent être localisés sous les bâtiments, avant la construction, et que leur durée de vie sans maintenance peut être garantie au-delà de 50 ans. Ainsi, un champ de sondes géothermiques de 2 millions de m^3 ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, sur 200 m de profondeur), sous un parking par exemple, pourrait desservir un quartier de 15 000 habitants.

Cette solution du champ de sondes n'est pas la seule disponible. Lorsque les niveaux aquifères exploités restent peu circulants, la solution ATES est elle aussi performante (dans le cas contraire, l'énergie est transportée de



Double U
Deux circuits indépendants

² Remarque pour les plus curieux concernant la prise en compte des bâtiments tertiaires: s'ils sont présents, les locaux tertiaires et de commerce ont des modes de consommation inversés vis-à-vis des logements et, avec l'amélioration des isolations thermiques, tendent à rejeter

quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres par saison et il est nécessaire de raisonner à une échelle moins locale). De manière générale, toutes les solutions de stockage souterrain sont efficaces, avec souvent des pertes thermiques négligeables lorsque la température moyenne du stock sur une année reste du même ordre que la température naturelle du sol (soit de l'ordre de 15°C à 20°C selon la ville et la profondeur atteinte).

Des moyens de distribution eux aussi efficaces

Reste une dimension essentielle : pour être efficaces, ces solutions de stockage d'énergie thermique doivent être raccordées à des moyens de distribution eux-mêmes efficaces. Et une telle technologie existe. Connue en France sous la dénomination de « réseau en boucle tempérée », elle est aidée au titre du Fonds Chaleur de l'ADEME. Un tel réseau se caractérise par une circulation d'eau à une température peu différente de la température du sol ; ce qui minimise les pertes thermiques et permet indifféremment les usages pour la production de chaleur, pour le rafraîchissement ou la production de froid négatif. Chaque bâtiment, ou groupe de bâtiments, dispose alors de sa propre machinerie thermodynamique lui permettant d'optimiser ses consommations. Sont seulement réinjectés dans le réseau, les excédents pouvant être des rejets chauds ou froids qui peuvent correspondre à des demandes d'autres d'usagers du réseau. Ce processus de mutualisation des énergies thermiques permet in fine de limiter les sollicitations des stockages souterrains et autres ressources extérieures. Là encore, la technologie paraît simple mais elle pâtit souvent de la (fausse) croyance qu'il faut (fallait !) la concevoir avant l'implantation des bâtiments.

Bilan : si on veut, on peut

Le dernier bilan du Fonds Chaleur a fait état de seulement 156 opérations géothermiques aptes à gérer du stockage thermique sur 3 266 opérations aidées. Pourtant tout est prêt pour une utilisation à grande échelle de ces technologies éprouvées, comme certains pays nordiques commencent à le montrer. Suivre leur route ne demande qu'un peu de travail, à commencer par l'adaptation de certaines réglementations dépassées, et un peu de volonté et d'appétit pour le « temps long » en acceptant des retours sur investissement moins rapides mais estompant certaines incertitudes sur l'approvisionnement futur en énergie ■

annuellement plus d'énergie thermique qu'ils n'en nécessitent pour le chauffage et l'ECS ; les climatisations se comportant alors un peu comme du captage solaire indirect venant en déduction des surfaces de panneaux solaires.

Déchets : des ressources à valoriser ou une nécessité de réduction à la source ?



Flore Berlingen est depuis fin 2013 la directrice de Zero Waste France (anciennement le Cniid), une association de protection de l'environnement spécialiste de la question des déchets. A ce titre, elle est l'une des porte-paroles du mouvement et spécialiste de la démarche zéro déchet, zéro gaspillage en Europe, et la co-auteur du **Scénario Zero Waste** publié aux éditions Rue de l'Echiquier.

La Loi de Transition Energétique (LTE) entrée en vigueur en août 2015 fait la part belle à la question des déchets. Son titre 4 sur l'économie circulaire semble afficher des ambitions fortes : réduction de 10% des déchets ménagers par habitant d'ici 2020 par rapport à 2010, obligation de tri à la source des biodéchets d'ici 2025, réduction de 50% des produits manufacturés non recyclables pour 2020, et passage de 41 % à 55% (2020), puis 65% (2025), de la proportion de déchets faisant l'objet d'une valorisation sous forme de matière (recyclage, compostage, méthanisation)... S'ajoutent à ces objectifs généraux quelques mesures emblématiques – qu'il faut après tout saluer – comme l'abandon des sacs de caisse non compostables et des films plastiques non biodégradables pour les journaux.



Une économie bien peu circulaire

Pourtant, même en suivant à la lettre les prescriptions générales ou les obligations concrètes de cette nouvelle loi, il y a encore loin entre notre système actuel et une économie (réellement) circulaire. Nous avons tous en tête que nous jetons environ 1 kg par personne et par jour dans nos poubelles, et notre attention de « bon citoyen » se concentre sur son meilleur recyclage (tri du verre, du métal, des papiers et cartons, des plastiques d'emballage, voire des vêtements). Mais il ne faut pas oublier qu'en ajoutant les déchets municipaux et des collectivités, cette quantité monte à 1,6 kg par personne et par jour ; auxquels se rajoutent 10,7 kg de déchets du BTP, et 4,4 kg de déchets industriels (dont 0,3 kg de déchets dangereux). Ce sont donc environ 17 kg que nous jetons chacun, chaque jour.

La saturation autour des grandes agglomérations (comme le Grand Paris) et le manque de matériaux de construction a fait prendre conscience à la filière

et aux pouvoirs publics de l'enjeu autour des déchets du BTP et de l'intérêt de leur réemploi ou leur meilleure valorisation. Même s'il reste quelques challenges techniques, la volonté est là et la LTE va d'ailleurs dans ce sens : d'ici 2020, les services de l'Etat et les collectivités territoriales devront s'assurer que 70% des matières et déchets produits sur les chantiers de construction ou d'entretien routiers dont ils sont maîtres d'ouvrage sont réemployés ou orientés vers le recyclage.

Du côté des déchets industriels, les choses sont plus floues. Certes, des filières à responsabilité élargie du producteur (REP) permettront de développer le réemploi et la réutilisation d'équipements électriques et électroniques, des textiles et des éléments d'ameublement. Mais, si les déchets d'activités économiques devront se réduire par unité de valeur produite, la réduction n'est pas chiffrée.... Et si l'obsolescence programmée peut désormais être punie, l'explosion de la quantité de déchets électroniques, très difficilement recyclables et extrêmement polluants, provoquée par la numérisation de nos vies n'est pas encore considérée comme un enjeu inquiétant par la population.

Déchets ménagers : la course au gigantisme ?

Toujours selon la LTE, les futurs incinérateurs devront être dimensionnés « au regard d'un besoin local et conçus de manière à être facilement adaptables pour brûler de la biomasse ou, à terme, d'autres combustibles afin de ne pas être dépendants d'une alimentation en déchets ».

Pourtant, face à des volumes parfois croissants – populations en augmentation sur des territoires plus concentrés, faible réduction ou stagnation des quantités unitaires – la stratégie choisie par de nombreuses communes a souvent consisté à investir dans des incinérateurs de très grande capacité, aux investissements importants et requérants, pour leur équilibre économique, des volumes collectés sur des distances toujours plus grandes.

Ainsi le nouveau projet IP13 du Syctom¹ prévoit la reconstruction de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII et la construction d'une unité de valorisation organique de type tri mécano-biologique (TMB) avec méthanisation (capacité : 700 000 t/an). A terme, 536 000 tonnes d'ordures ménagères seraient traitées chaque année sur le site : 226 000 tonnes seraient directement dirigées vers l'incinérateur, 310 000 tonnes subiraient un prétraitement de tri mécano-biologique ; sur ces 310 000 tonnes, 124 000 tonnes à haut pouvoir calorifique seraient redirigées vers l'incinérateur.

Sommes-nous condamnés à perpétuer un gigantisme de cette nature ? Quelle est la pertinence, la résilience d'un tel projet face aux ambitions de muter vers une économie circulaire ? Le choix économique est questionnable, mais le choix technique est également contestable : si le TMB a parfois été considéré comme un nouveau graal par de nombreuses collectivités ces dernières années, il est loin de faire l'unanimité car le « produit de sortie » est un compost qui contient encore de nombreux déchets plastiques, etc. dont

¹ L'agence métropolitaine parisienne des déchets ménagers, qui traite et valorise les déchets ménagers de 5,7 millions d'habitants des 84 communes adhérentes.

les agriculteurs ne veulent pas, à juste titre. La LTE énonce en outre que « La généralisation du tri à la source des biodéchets, en orientant ces déchets vers des filières de valorisation matière de qualité, rend non pertinente la création de nouvelles installations de tri mécano-biologique d'ordures ménagères résiduelles n'ayant pas fait l'objet d'un tri à la source des biodéchets ».

Zero Waste France et le Collectif 3R (Réduire, Réutiliser, Recycler), deux associations citoyennes, ont donc pris IP13 comme un cas d'école et décortiqué l'ensemble des données disponibles sur la production et la gestion des déchets du territoire du Syctom. Ces analyses ont abouti à la conclusion qu'avec un certain nombre d'actions ciblées, inspirées des démarches Zero Waste (zéro déchet, zéro gaspillage), le défi pouvait être relevé.

La réduction à la source, tellement plus simple

Un plan alternatif, baptisé Plan B'OM pour Baisse des Ordures Ménagères², a donc été rédigé, basé sur une forte réduction des volumes à traiter, permettant de se passer totalement de la future usine tout en cessant totalement aussi l'enfouissement des ordures ménagères en décharges ! Il propose plusieurs chantiers prioritaires (papiers-cartons, bio-déchets, amélioration du tri...) concrets, faisables, et créateurs d'emplois – au moins 50% d'emplois directs en plus dans les filières de valorisation matière, sans compter les emplois indirects liés à la prévention.



² le plan B'OM est téléchargeable sur le site planbom.org

Bien sûr, il faut mieux valoriser les déchets, ils sont une future « ressource à exploiter » dans un monde de demain, aux contraintes environnementales plus grandes et aux matières premières moins disponibles. Les groupes industriels du traitement des déchets évoluent dans leur stratégie, passant de l'exploitation de décharges ou d'incinérateurs à celle d'usines de recyclage... Mais ne nous y trompons pas, le véritable enjeu, celui qui assurera une économie circulaire et résiliente, est la réduction à la source : circuits de réemploi, réseaux de réparation, systèmes basés sur les emballages consignés, compostage généralisé, seront demain une source d'activités pérennes, de développement local, de lien social, d'amélioration de la qualité de vie, voire d'écosystèmes revigorés.

Partout, les initiatives fleurissent à l'échelle individuelle et à l'échelle des territoires. Ainsi, sur la prévention, des territoires zéro déchet, zéro gaspillage (exemple très médiatisé de Roubaix et son défi familles zéro déchets) ; des groupes citoyens, des bloggeurs et des réseaux sociaux échangeant conseils, solutions et bonnes pratiques autour du mode de vie zéro déchets ; des entrepreneurs, toujours plus nombreux, qui se lancent dans la vente 100% vrac, et/ou zéro emballage jetable, et/ou basés sur des circuits courts (exemple du réseau VRAC initié par Zero Waste France, ou de l'épicerie La Recharge à Bordeaux). Ainsi du compostage, soutenu par les collectivités locales, pratiqué par les particuliers, mais aussi, de plus en plus, à l'échelle de bâtiments collectifs ou de quartiers... voire de villes entières avec la collecte séparée des bio-déchets (Lorient, San Francisco, Milan, Barcelone...). Et d'autres expérimentations intelligentes (comme la distribution de poules pour ceux qui ont un jardin) se multiplient ! Une voie à suivre pour la « smart city » de demain ?

Dans les déchets industriels et issus des activités économiques, il reste beaucoup à faire. On parle de plus en plus « d'écosystèmes industriels », de capacité des entreprises à travailler en réseau pour que les déchets des uns deviennent – plus qu'aujourd'hui – les matières premières des autres.

Mais au-delà de quelques exemples emblématiques souvent cités, peu d'avancées réelles sont constatées. Si les industriels ne veulent pas se retrouver à la traîne des citoyens, il y a un immense champ d'investigations à mener, de nouveaux modèles à inventer, de choix courageux à effectuer, pour mettre en œuvre le zéro déchet industriel et soutenir le zéro déchet des consommateurs ■

QUIZ : quel «technodurable» êtes-vous ?

Pour vous aider à vous situer, voici un petit questionnaire ...



1. La pollution générée par la mobilité motorisée devient ingérable, tant au niveau mondial (consommation de pétrole, émissions de CO₂...) qu'au niveau local (oxydes d'azote, particules fines, etc.)

A. La voiture autonome va régler tout ça. En optimisant les parcours, la conduite, le taux d'utilisation et de remplissage, fini les embouteillages et la pollution ! Plus de galère à chercher la place de parking, moins de véhicules à produire, et d'ailleurs les routes fourniront de l'énergie photovoltaïque 100 % verte.

B. Vous n'utilisez jamais de voiture. D'ailleurs, vos besoins de déplacement sont modestes et vous avez la chance de pouvoir vous approvisionner à quelques kilomètres de chez vous.

C. Vous avez investi dans un véhicule hybride. Car vous êtes très sensible à la pollution générée, et vous passerez au 100 % électrique dès que le gouvernement aura déployé suffisamment de bornes de recharge. Vivement 2030 !

D. Et si l'on enfourchait un vélo plus souvent ? Même si les voitures sont de plus en plus efficaces, elles sont toujours plus lourdes... et nous sommes probablement mal partis si toute la planète adopte notre mode de transport.

2. L'économie numérique présente de formidables opportunités. Elle permet par exemple l'essor de l'économie du partage...

A. Absolument ! Et ces nouveaux sites de partage sont aussi créateurs de valeur pour l'actionnaire. Aujourd'hui, on peut emprunter sa perceuse à son voisin - au lieu d'en avoir une chacun - et pour une somme très modique, avec un simple clic sur son smartphone ! Génial, non ?

B. Vous utilisez assez peu la perceuse. La décoration ce n'est pas vraiment votre truc...

C. Tout à fait ! Grâce à l'auto-partage et la location entre particuliers, nous avons fait de belles affaires pour nos escapades week-end et nous avons même économisé de quoi partir l'été prochain au Pérou avec une petite agence de tourisme équitable.

D. Dans l'économie du partage, tous les modèles ne se valent pas... certains consistent à mieux utiliser nos objets, c'est intéressant. Mais d'autres consistent surtout à monétiser des choses qui ne l'étaient pas. Et gare à l'effet rebond !

3. La dépense énergétique dans le bâtiment est un grand enjeu de la lutte contre le changement climatique ...

A. On construit désormais des bâtiments de faible bilan carbone et à énergie positive. Les progrès sont incroyables dans les nanomatériaux, les vitrages faiblement émissifs, la gestion électronique de la consommation... et l'arrivée des compteurs intelligents dans les foyers va permettre d'optimiser le système. Grâce aux énergies renouvelables décentralisées, nous serons demain tous producteurs et consommateurs.

B. L'habitat traditionnel avait déjà tout inventé (inertie thermique, petites ouvertures, ventilation naturelle, constructions mitoyennes). Pas de quoi s'extasier sur les nouvelles technologies de construction...

C. Vos résidences principale et secondaire sont équipées du dernier cri en matière d'efficacité énergétique. Panneaux solaires, pompe à chaleur, triples vitrages, double-flux, chaudière à condensation... En hiver, il fait 23°C dans la maison (c'est nécessaire car vous avez de jeunes enfants) avec à peine 50 kWh par an et par m². Label A++ !

D. Peut-être pourrait-on baisser un peu la température de consigne et enfiler un pull-over... Un grand programme de rénovation thermique dans le bâtiment est nécessaire, mais au rythme actuel il faudra plus d'un siècle.

4. Le système agricole semble être à bout de souffle. Pourtant il y aurait tant à faire...

A. Nous n'avons pas pris assez vite le virage de la mondialisation. Pour résister à la compétition, il faut jouer sur l'effet d'échelle et agrandir les exploitations. Aujourd'hui, robots de traite, drones de surveillance des cultures, big data permettent de réduire les coûts et optimiser les rendements... sans parler des OGM, indispensables pour éradiquer la faim dans le monde.

B. Avec l'autoproduction, au moins vous savez ce que vous mangez. Le système est devenu trop complexe et on ne peut plus avoir confiance.

C. Vous n'achetez plus que bio – l'italien est meilleur que l'espagnol, dit-on – et vous réfléchissez même à entrer dans une AMAP locale. C'est vrai qu'entre le minéral de cheval roumain et les pesticides dans les fruits et légumes, il y a de quoi faire !

D. Et si l'on réfléchissait à de la polyculture-élevage de plus petite échelle, respectueuse du vivant ? On a fait les usines à cochon d'un côté, et le « désert » des grandes cultures de l'autre. A la clé, pollution aux nitrates, dépendance au phosphore minier, épuisement des sols, destruction de la biodiversité ...





5. Les nouvelles technologies (informatique, télécommunications...) consomment beaucoup de ressources rares et d'énergie et génèrent des déchets fort polluants ...

A. C'est le secteur où l'innovation est la plus efficace. Ce n'est donc qu'un mauvais moment à passer : par exemple les centres de données, dépensent toujours moins d'énergie par unité de calcul ou de stockage. S'il y a tension sur les ressources, le prix augmentera et on recyclera mieux les déchets, en attendant les biomatériaux.

B. On s'en sortait très bien aussi sans tout cela. Personnellement vous survivez sans portable.

C. Absolument, ces images d'enfants pieds nus dans des boues toxiques au Ghana ou en Chine sont révoltantes. Vous avez d'ailleurs votre smartphone depuis plus de deux ans et demi – bien

mieux que la durée moyenne de 18 mois –, et vous êtes inscrits en liste d'attente pour l'achat d'un fairphone équitable.

D. Il faut réfléchir à notre usage dispendieux de la technologie. Sans jeter le bébé avec l'eau du bain, avons-nous besoin du temps réel et du sans fil partout et tout le temps ? D'échanger toujours plus de vidéos et photos haute résolution ? De rester dans une course à la puissance entre logiciels et équipements ?

6. On parle d'une nouvelle révolution, celle de l'internet des objets. Au printemps 2015 est sorti le premier bikini connecté – il vous prévient sur smartphone qu'il est temps de vous retourner – ou de vous étaler une nouvelle couche de crème protectrice – si vous voulez éviter les coups de soleil ...

A. Ce n'est pas un gadget. Car on empêchera ainsi de nombreux cancers de la peau ! Toutes ces nouvelles applications permettront un monde meilleur, grâce à la prévention médicale et à la gestion des risques sanitaires par les big data. Google a même promis de faire reculer l'âge de la mort si on lui donne accès aux données de la Sécurité sociale...

B. Un quoi ?

C. Il me semble que certains usages seraient plus utiles. Comme ces vieux téléphones portables qu'on peut poser sur les arbres de la forêt tropicale, et qui permettent d'alerter les gardes-forestiers au moindre bruit de tronçonneuse alentour...

D. Mais où s'arrêtera la technologie ? Des chercheurs, inspirés par la « réalité virtuelle » des jeux vidéo travaillent à mettre au point un casque pour poulet : toujours élevés en batterie, ils percevront des informations leur faisant croire qu'ils sont en plein air dans le Gers. *O tempora...*

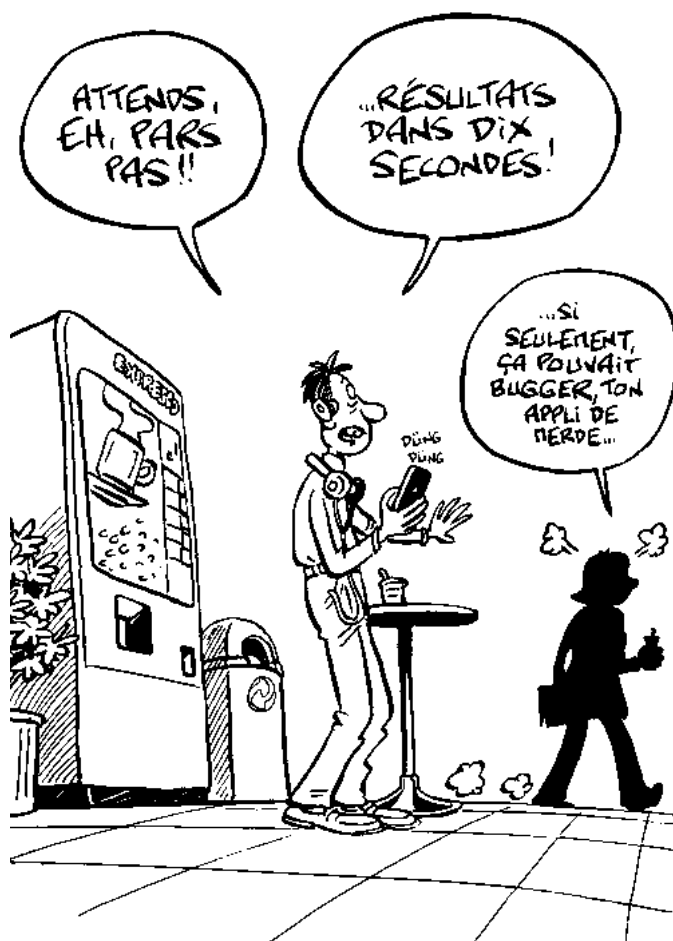
7. Quid de notre organisation industrielle ? Il paraît que des coquilles St-Jacques – et même des boyaux de porc vides – font l’aller-retour entre la France et la Chine pour être nettoyées, avant d’être garnies de farce ...

A. Bof, de toute manière, bientôt cette question deviendra secondaire. Avec les imprimantes 3D à steak, à base de cellules souches, terminés les problèmes environnementaux ou même la maltraitance des animaux !

B. Où ça ?

C. Effectivement il doit être compliqué d’assurer la traçabilité d’une telle chaîne logistique. Savez-vous si cela concerne aussi les saucisses barbecue bio ?

D. Oui, nous sommes peut-être allés un peu trop loin dans l’application des « avantages comparatifs »...



Les résultats

Vous avez une majorité de A :

Vous pensez que la technologie a réponse à tout. Révolution(s) numérique(s), troisième révolution industrielle, « uberisation » de la société, ruptures technologiques, dernières percées scientifiques, rien de tout cela n'a de secret pour vous. Cela vous rend très optimiste – on pourrait dire même « technoptimiste » – pour le monde de demain... enfin, peut-être celui d'après-demain, car les promesses se font toujours un peu attendre, non ? Et êtes-vous bien sûr que tout cela va marcher ?

Vous avez une majorité de B :

Vous aimez les peaux de bêtes, et pas seulement devant la cheminée pour vos week-ends chasse en Sologne. Peut-être même êtes-vous pour le retour à la bougie, voire l'âge des cavernes ? A moins que vous ne l'ayez tout simplement jamais quitté ? Mais non, les low tech ne sont pas affreusement rétrogrades et passésistes ! Mettez-vous au goût du jour : il est peut-être temps d'orienter notre innovation vers l'économie de ressources...

Vous avez une majorité de C :

Bravo, vous êtes un éco-consommateur informé et impliqué ! Vous êtes citoyen du village planétaire, our spaceship Earth, et vous ne manquez jamais une e-pétition pour changer le monde en quelques clics. Dans une économie de marché, c'est aux clients de peser sur les fournisseurs pour faire évoluer le système. D'ailleurs, les initiatives fleurissent partout... Ah, si tout le monde était comme vous, la face du monde serait changée... enfin, peut-être. A moins que notre modèle ne soit pas généralisable ?

Vous avez une majorité de D :

Tiens, vous semblez un peu dubitatif sur notre capacité collective à répondre aux enjeux planétaires. N'êtes-vous pas convaincu par les formidables avancées environnementales des dernières décennies – il paraît que Londres était bien plus affreusement pollué dans les années 1950, sans parler de Manchester au XIX^{ème} siècle – ? Seriez-vous trop rationnel pour goûter à toutes les solutions technologiques miracles ? Comme M. Jourdain, peut-être êtes-vous low tech sans le savoir ? Il est temps de vous pencher sur la question !



Une technique pour habiter le monde



Olivier Rey est chercheur au CNRS, membre de l'Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques (IHPST, Paris). Il a enseigné les mathématiques à l'École polytechnique dont il est ancien élève (1984) et enseigne aujourd'hui la philosophie à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. Son dernier essai publié, ***Une question de taille*** (Stock, 2014), est tout entier consacré aux questions d'échelle, de proportions et de juste mesure.

Nous employons le même mot de « société » pour désigner aussi bien une tribu de chasseurs-cueilleurs du paléolithique que les gigantesques agrégats humains contemporains, comme si les formes de vie collective n'étaient pas radicalement différentes dans les deux cas ; nous qualifions de « démocratie » aussi bien le système politique de l'Athènes du Ve siècle avant notre ère que celui de l'Inde contemporaine, comme s'il y avait une essence de la démocratie qui demeurerait inaltérée lorsqu'on passe d'une population de 400 000 habitants, dont un dixième seulement de citoyens, à une population de plus de 1,2 milliard d'habitants, avec plus de 700 millions de votants aux élections générales. Quel sens y a-t-il à ranger sous la même étiquette des réalités que les changements d'ordre de grandeur rendent si dissemblables ? Il en va de même avec « la » technique. Comme s'il y avait une essence de la technique qui se conservait inchangée entre la taille des silex par les hommes préhistoriques et l'industrie informatique ou les centrales nucléaires d'aujourd'hui, comme si une pratique qui ne suppose que des cailloux et l'usage de ses mains était commensurable à un complexe scientifico-industriale-économique qui n'est à la mesure de personne. En appelant tout cela, indistinctement, technique, on n'éclaire pas la pensée, on l'aveugle. De là la stupide alternative qui nous est ordinairement proposée, entre « technophilie » et « technophobie » : il faudrait tout accepter ou tout rejeter, s'enchanter de l'artificialisation totale de l'existence ou retourner à la bougie, voire à la caverne et aux peaux de bête.

Un immense mérite du concept de *low tech* est de venir briser la fausse homogénéité de la technique ; et de nous placer devant la véritable alternative, qui n'est pas adhésion ou opposition à la technique, mais persévérance dans le développement de techniques de plus en plus lourdes et sophistiquées, ou orientation vers le développement de techniques « conviviales », c'est-à-dire, au sens où Ivan Illich entendait ce terme, proportionnées à nos capacités naturelles. Certes, de telles techniques ne sauraient permettre tout ce que les techniques de pointe réalisent ou promettent. Difficile, par exemple, de songer avec elles à se transporter un jour sur une autre planète. Mais notons-le : le voyage interplanétaire

suppose, pour être accompli, une dépendance absolue du voyageur à l'égard du dispositif qui le transporte, et l'astronaute ressemble bien davantage à un serviteur impotent qu'à un maître triomphant. Par ailleurs, le voyage interplanétaire serait moins le témoignage d'une réussite éblouissante des humains que le signe de leur échec monstrueux : leur incapacité à habiter correctement la terre, les portant à chercher loin d'ici un nouveau lieu à ravager et à détruire. Les *low tech* ont, pour ce qui les concerne, un double objectif : au lieu d'humilier et d'écraser les capacités naturelles des êtres humains par des dispositifs démesurés elles visent, au contraire, à permettre à ces facultés de s'exprimer au mieux ; au lieu de viser une domination sans partage du monde, elles cherchent à élaborer les modalités matérielles d'une vie en harmonie avec lui. Ambition médiocre ? Ambition immense au contraire, auprès de laquelle le déchaînement de puissance dont le développement technique a donné le spectacle au cours des deux derniers siècles apparaît pour ce qu'il est : une échappatoire, une façon de se ruer vers le plus facile, une fuite devant la tâche qui nous incombe vraiment.

Beaucoup pensent que si la *high tech* peut s'avérer dangereuse, du moins l'intelligence, la hardiesse et l'innovation sont de son côté ; à rebours, *low tech* signifierait vie étriquée et stagnation. C'est l'inverse qui est vrai. Au point où nous en sommes, s'entêter sur l'unique voie des high tech relève non seulement de l'aveuglement devant les limites naturelles, auquel nous allons nous trouver de plus en plus durement confrontés, mais de la paresse d'esprit. Plus le mouvement se poursuit, plus nos possibilités de vie s'amenuisent. La modernité fait grand cas de l'autonomie : il serait temps de se rendre compte que cette autonomie, la technique ne peut la servir que par son versant *low*, si négligé au cours des siècles écoulés. Les progrès à accomplir sur ce terrain laissé en jachère sont innombrables. Et si les quantités de matière et d'énergie que les *low tech* mettent en jeu demeurent limitées, l'ingéniosité technique susceptible de s'y investir est quant à elle illimitée ■

Table des matières

Avant-propos

Préface	Jean-Georges Malcor	Page 1
---------	---------------------	--------

Introduction

Editorial	Etienne Klein	Page 2
Brèves remarques sur les choix technologiques dans l'Histoire	François Jarrige	Page 4

Vers une approche "citoyenne" de la technologie

Choix technologiques et durabilité : l'impasse du "tout high tech" et de la "Troisième Révolution Industrielle"	Jacques Millery	Page 8
Vers des technologies sobres et résilientes	Philippe Bihouix	Page 14

Des exemples à méditer dans chaque secteur

Transports : l'automobile face au "toujours plus"	Laurent Castaignède	Page 19
Bâtiment : repenser la ville comme un écosystème	Stéphane Cochet François Bourmaud Julien Langé	Page 23
Agriculture : utiliser la nature comme réservoir de productivité	Charles "Sacha" Guegan	Page 27
Santé & hygiène : mens sana in corpore sano	Marie Aichagui	Page 31
L'écoconception logicielle pour un numérique durable	Thierry Leboucq	Page 35
Enjeux énergétiques : le défi du stockage relevé par la thermique	Hervé Lesueur	Page 38
Déchets : des ressources à valoriser ou une nécessité de réduction à la source	Flore Berlingen	Page 42

Quiz

Quel "technodurable" êtes-vous ?	Philippe Bihouix Isa	Page 46
----------------------------------	-------------------------	---------

Conclusion

Une technique pour habiter le monde	Olivier Rey	Page 51
-------------------------------------	-------------	---------

Remerciements

Le comité de rédaction (Marie Aichagui, Philippe Bihouix, Marc Coeuillet, Jacques Millery) tient à remercier l'ensemble des contributeurs de ce hors-série, ainsi que Yolande Ricart, déléguée générale de l'Association des Centraliens, pour son soutien au projet, les membres du comité de rédaction de la revue Centraliens pour leur relecture avisée, et les groupements professionnels Ingénieur & Développement Durable et Economie Sociale & Solidaire pour leur support.

« [J'ai] la conviction que la conception mécanique du monde, qui apparut au XVII^e siècle, doit être remplacée par une autre conception rendant toute justice à la nature humaine. Pour sauver notre science et notre technique, nous devons d'abord sauver l'homme. La réponse aux problèmes posés par la technique, on ne la trouvera pas dans la technique ni dans l'application de ces méthodes de pensée qui ont justement créé une disparité tellement ironique entre nos moyens physiques et nos fins sociales, entre la méthode scientifique et la discipline morale. »

Lewis Mumford, **Technique et Civilisation**, 1950

Les ingénieurs se sont souvent trouvés à la croisée des innovations technologiques et des évolutions sociétales. A l'heure où la nécessité de construire une société « durable » est devenue criante, dans un monde plus que jamais transformé par les technologies, des Centraliens toujours plus nombreux, de toutes générations, citoyens, parents, consommateurs ou professionnels engagés, se posent la question : nos choix technologiques actuels sont-ils réellement appropriés à la durabilité des sociétés humaines ?

Ces choix devraient favoriser une consommation réduite ou nulle de ressources rares ou non recyclables, et rechercher non seulement l'efficacité mais aussi la stabilité et la résilience. La high-tech appliquée sans jugement permet-elle cela, ou bien faudrait-il privilégier l'articulation appropriée et raisonnée de tous les savoirs et savoir-faire technologiques accumulés, certains à la pointe du progrès comme d'autres à redécouvrir et à recombinaison de manière originale (dans une approche low tech) ?

Forts de leurs parcours d'ingénieurs dans des secteurs variés, et dans la continuité de travaux déjà effectués au sein de notre communauté d'anciens, des Centraliens ont tenté de répondre à ces questions, ou du moins d'ouvrir le débat. Scientifiques, historiens, philosophes des sciences, ingénieurs et spécialistes sectoriels nous amènent, de manière factuelle et argumentée, à réfléchir au-delà des effets de mode. Leurs conclusions devraient interpeller tous ceux qui aspirent à « changer le monde ». Elles confirment la nécessité d'une approche citoyenne de l'ingénieur, qui devra changer de paradigme, en repensant l'innovation technologique au service d'un projet sociétal durable, sans rejeter les leçons des savoirs passés. La high-tech triomphante peut-elle « sauver le monde » ? Ou pas ? Vous pourrez vous faire votre propre opinion en lisant cet opuscule.



Prix : 15 €