

La demande comme levier de décarbonation : visions, disparités et limites

Par Nadia MAÏZI

Centre de mathématiques appliquées, MINES ParisTech, PSL Research University

À travers l'exploration de scénarios contrastés, nous évaluerons les fondamentaux sur lesquels reposent des visions alternatives du futur qui partagent les mêmes ambitions de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour cela, nous distinguerons les trajectoires s'appuyant sur un credo technologique, en vertu duquel une offre adaptée devrait permettre de pourvoir aux contingences climatiques, de celles qui considèrent que les aspects sociétaux, les modes de vie et les comportements seront les leviers principaux pour opérer une réelle bifurcation vers un monde bas carbone.

Ce choix narratif nous transportera d'un monde tout électrique vers un monde de sobriété.

Au terme de notre réflexion, nous défendrons le point de vue qu'une réconciliation de ces postures est un incontournable pour le règlement de la question climatique.

Mise en bouche

Alors que jusqu'à aujourd'hui, la transition vers un monde « bas carbone » a été majoritairement envisagée à travers des scénarios *techno-push*, nombreux sont ceux qui prônent désormais de considérer la demande et particulièrement la demande en énergie comme un nouveau levier de la décarbonation.

Notamment de nombreux scientifiques (voir par exemple les références [1] et [2]) s'expriment en faveur de la prise en compte des processus sociaux dans les agendas de recherche, jusqu'alors essentiellement technologiques, qui sont dédiés à l'élaboration de la transition bas carbone. Un témoignage majeur de ce changement de point de vue est la décision d'intégrer dans le prochain rapport d'évaluation du GIEC (Groupement international d'experts sur le changement climatique) un nouveau chapitre consacré à la demande, aux services et aux aspects sociaux de la mitigation (Chapter 5, Working Group III). Il s'agit de repenser la question de la transition bas carbone en évitant un certain nombre d'écueils, dont les suivants, répertoriés par la référence [3], nous paraissent primordiaux :

- une ultra-simplification des réalités sociales et le peu d'attention accordée aux acteurs et à leurs comportements (aspects politiques, luttes de pouvoir, croyances et stratégies) ;
- un recours limité au changement des règles économiques, sociales et institutionnelles ;
- la prépondérance accordée aux mécanismes économiques, laquelle contraste avec une prise en compte limitée des processus associés à leur implémentation.

Au centre du débat sur les options de décarbonation se situe la question de l'évolution de la demande en énergie au cours des prochaines décennies.

Si cette demande est souvent exprimée en énergie finale, nos remarques liminaires nous enjoignent donc à ne pas négliger les moteurs de cette consommation d'énergie, lesquels sont multiples puisqu'associés aux services dépendants de nos usages – se transporter, se chauffer, se distraire... –, eux-mêmes conditionnés par des modes de vie qui reflètent des aspirations, des comportements, un environnement social...

Dans ce contexte, nous nous proposons de revisiter diverses visions du futur : pour une même ambition de décarbonation (celle des accords internationaux par exemple), ces visions, inscrites dans des choix d'évolution de société différents, décrivent des paysages de la demande énergétique contrastés, pour lesquels les choix techniques d'une transition énergétique bas carbone doivent être discutés.

Ainsi, nous envisagerons, d'une part, l'explosion de la demande dans un monde tout électrique, dont la matérialité reste à discuter, et, d'autre part, une vision sobre, qui parie sur un mode de vie associé au concept de décroissance.

La tendance : une explosion de la demande électrique

Ces vingt dernières années, la consommation électrique est caractérisée par une progression continue (mise à part la période de crise 2008-2009 qu'ont traversée principalement les pays de l'OCDE) de sa part dans le mix

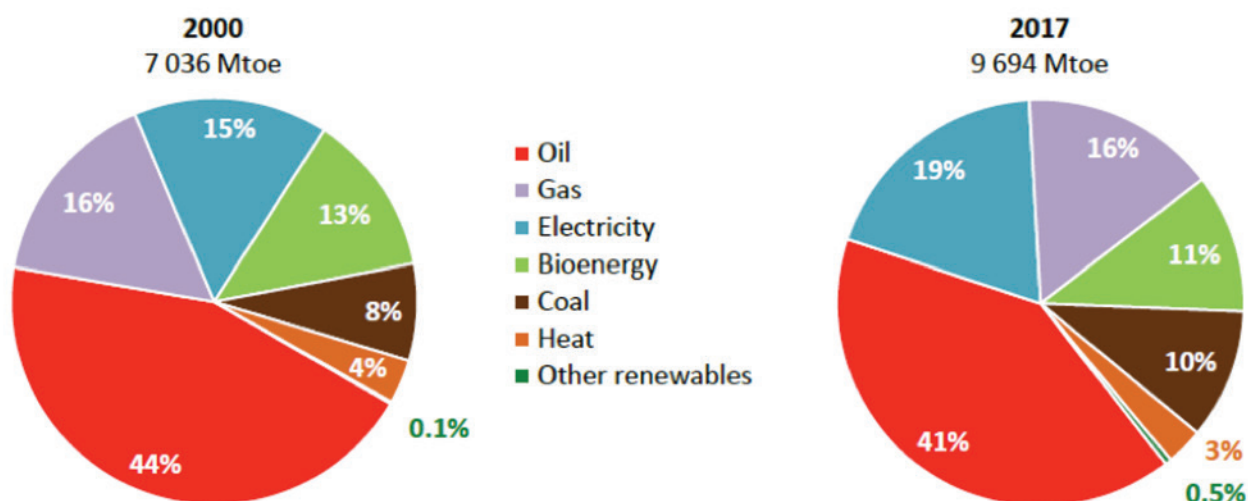


Figure 1 : Part de l'électricité dans la consommation en énergie finale (Source : [4], d'après [5]).

énergétique global : alors qu'en 2000, la consommation électrique représentait un peu plus de 15 % de la consommation d'énergie finale, cette part atteignait 19 % en 2017 (voir la Figure 1 ci-dessus), affichant une augmentation de 70 % en valeur absolue au cours de la même période.

La demande d'électricité, en part relative, est en forte croissance : elle est le fait des pays émergents (en particulier, la Chine) et traduit leur développement rapide (voir la Figure 2 ci-après). Ces pays ont en effet doublé leur part dans la consommation électrique depuis 1974, tirant parti d'une progression exceptionnelle du taux annuel moyen de leur production électrique entre 2000 et 2010, qui atteint 6,4 % dans les pays hors OCDE⁽¹⁾.

(1) Ce taux est de 1,1 % dans les pays de l'OCDE.

Alors qu'en 2017, les 22 200 terawatt/heure (TWh) portent l'électricité au second rang dans le mix de consommation énergétique, derrière la consommation de produits pétroliers dont elle représente un peu moins de la moitié, sa part de 19 % ne doit pas occulter le niveau réel du service rendu qui lui est associé : en effet, l'efficacité du vecteur électrique en termes d'usage (niveau de service rendu) lui permet au-delà de servir d'autres vecteurs et de satisfaire 27 % de la demande utile (voir la référence [4]).

Plaidoyers pour un monde tout électrique

Dans le prolongement de cette dynamique, perçue comme une indication de ce que devrait être la tendance au cours des prochaines décennies – à savoir, favoriser la

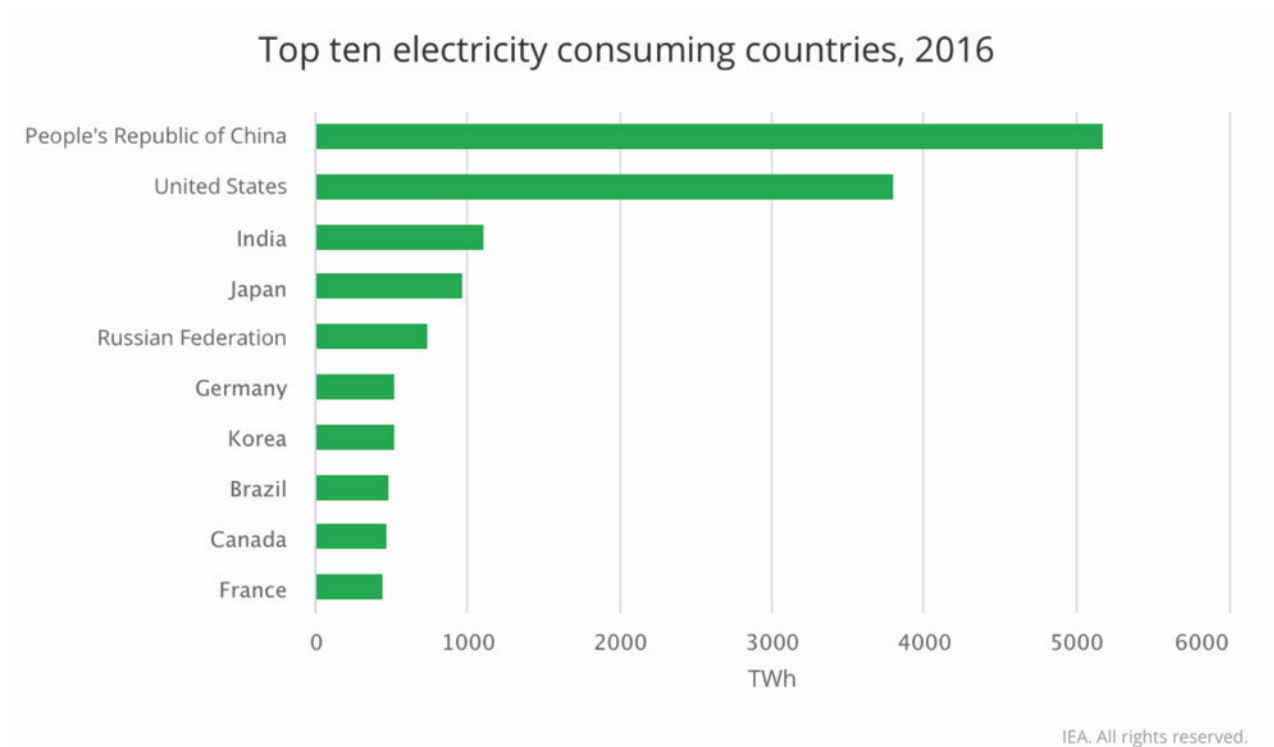


Figure 2 : Les dix premiers pays les plus gros consommateurs d'électricité (Source : [5]).

croissance économique, l'électrification et la digitalisation des usages –, nombre des scénarios ⁽²⁾ répertoriés dans la référence [6] proposent un futur dominé par le vecteur électrique.

L'analyse de ces projections indique une plage de croissance de la consommation d'électricité mondiale comprise entre 50 % et 84 % d'ici à 2035, avec la part belle donnée aux économies émergentes qui connaîtraient une progression de 80-90 %.

Cette formidable explosion de la consommation s'appuie sur l'idée d'une mutation de tous les secteurs vers le vecteur électrique, en accentuation des tendances actuelles, voire en les dépassant largement.

Ainsi, les visions envisagées anticipent :

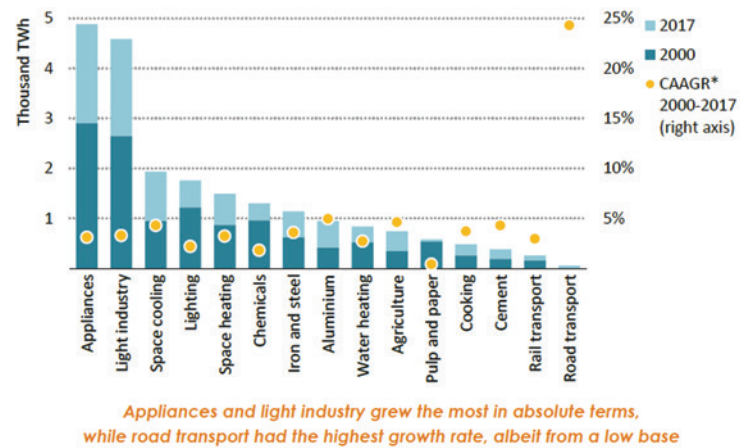
- la prédominance de l'électricité dans le secteur du bâtiment (qui représentait en 2017, 32 % de l'énergie finale ou 47 % de l'énergie utile (voir la Figure 3 ci-contre)), avec une amplification du phénomène qui, selon certains ([7]), pourrait aller jusqu'à une électrification à 100 % des usages (cuisson, chauffage/AC (air conditionné), appareils, eau chaude sanitaire...);
- dans le secteur des transports, qui ne comptait en 2017 que pour 2 %, avec une part du rail en représentant les 2/3, la croissance rapide actuelle de plus de 2,4 % (mais toute relative) devrait s'amplifier pour conduire, à terme, à un parc véhicule 100 % électrique dans les pays de l'OCDE, en particulier en Europe ([5]);
- dans l'industrie, qui avec une part de 40 % se situe en tête du classement de la demande électrique, même si elle connaît un déclin entamé depuis plusieurs décennies ([5]), le pari fait de l'électrification reste réservé aux économies émergentes, les autres pays ayant déjà opéré ce virage pour gagner en efficacité et en rentabilité.

Si la tendance haussière de la consommation d'électricité conduisant à la vision tout électrique est pour certains une bonne nouvelle, c'est parce qu'ils considèrent que, bien que les systèmes électriques n'affichent, à l'échelle mondiale, qu'une faible efficacité (autour de 30 %) et sont les premiers émetteurs de CO₂ (environ 45 %), les solutions technologiques existent pour améliorer leurs performances en tirant parti d'une tendance naturelle allant vers une évolution réversible du vecteur électrique (voir la référence [8]) : il s'agit, du côté de la demande, de déployer plus d'efficacité énergétique, et, du côté de la génération, d'introduire massivement les énergies renouvelables dispersées.

C'est l'option d'un scénario « tout électrique » (voir la référence [6]), qui permettrait de multiplier la part de l'électricité par trois dans le mix énergétique mondial (totalement renouvelable et numérique) et qui, selon ses promoteurs, conduirait à une multitude de bénéfices :

- une accélération significative du développement économique, rendue possible par une décroissance de la

(2) Scénarios élaborés par l'AIE (CPS : Current Policy Scenario ; New Policy Scenario : NPS, 450 scénarios, Greenpeace, The Energy [R] evolution, Ecofys/WWF ou encore l'IIASA.



* Compound average annual growth rate.

Figure 3 : Taux de croissance annuel de la consommation électrique par secteur/filière (Source : [4], d'après [5]).

dépense énergétique globale de 30 % et des niveaux de productivité non égalés depuis un siècle ;

- un effondrement des émissions de CO₂ de 65 % nous ramenant ainsi au niveau de 1960 ;
- enfin, une rupture de la logique des dépendances d'approvisionnement géopolitiques établies depuis des décennies avec une réduction de 80 % de celles-ci à l'échelle de la planète.

Au contraire de scénarios qui reposent sur des paris, comme le recours à des technologies pour « effacer » les émissions ou les rendre « négatives » (déploiement de capture et séquestration de CO₂), ce qui conforte cette vision du futur repose essentiellement sur la maturité technologique : “The ‘all electric’ world is not a forecast. It is a vision of a future, which is at reach with current available technologies.” [6].

Il n'en reste pas moins qu'un certain nombre d'éléments essentiels à la quadrature d'un cercle vertueux manquent.

Tout d'abord, de par son ampleur, le déploiement envisagé en termes de moyens de production d'électricité bas carbone renouvelables, assorti des moyens nécessaires au transport et au stockage de l'électricité, ne peut se concevoir sans considérer ses externalités en eau ([9], [10]) et en empreinte-matière ([11], [12]). En effet, si ce mix de production est aligné avec l'objectif de décroissance des émissions de carbone, ses besoins en métaux sont amenés à se renforcer à la fois pour la production et les usages de l'électricité ([12], [13]) : seraient en particulier impactées, à la hausse (et cela d'autant plus que seraient prises en compte les phases de construction, d'opération et de déclassement), les demandes de tellure (pour certains types de cellules photovoltaïques), de tantale, d'or, d'étain et d'argent (présents dans les condensateurs des onduleurs des installations photovoltaïques) ; et, du côté des substances non métalliques, nous citerons le sable (silicium, béton), le graphite (électrodes), le borate (agents chimiques) et le soufre (acide sulfurique), et bien évidemment, le cuivre, qui est présent partout. Bien sûr, il existe une importante disparité dans les volumes concernés ([13]), mais cette croissance des besoins signifie a

minima un rebond de la consommation énergétique du secteur de l'industrie minière et métallurgique, une tension sur les ressources et, par conséquent, de nouveaux risques en matière d'approvisionnement. Autant d'éléments qui tempèrent les conclusions positives de la vision « tout électrique ».

Quid des futurs modes de vie ?

Mais ce qui pêche le plus, finalement, dans cette vision est le peu de référence au choix de société associé à la trajectoire proposée, alors que la réflexion sur les options futures ne peut être décorrélée des évolutions comportementales, des modes de vie ou d'organisation sociale.

Si l'on prend pour exemple l'essor du numérique, comptabilisé en nouvelles connexions haut débit, on constate que ce sont les pays en développement qui concentrent plus de 90 % de la demande de nouveaux abonnements sur ces cinq dernières années (voir la référence [14]). Cette croissance rapide, qui contraste avec la tendance stationnaire de l'électrification (voir Figure 4 ci-après), indique que, selon les zones, beaucoup d'usages fondamentaux se sont déplacés vers la téléphonie mobile : transfert d'argent, déplacements... souvent par nécessité ; alors que dans les pays développés, il existe de nombreux substituts pour répondre à ces mêmes demandes. Cela signifie que la consommation électrique associée à une même demande de service pourra connaître des fluctuations très importantes et qu'il faut dès lors s'efforcer de refléter ce fait dans les scénarios discutés en prenant en compte l'influence de l'évolution des modes de vie (voir la référence [15]).

Cependant, dans une préoccupation symétrique d'objectivité, il ne faut pas penser que le choix de jouer sur le seul mode de vie sera le garant de la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Pour preuve, dans un exercice exploratoire de modes de vie sobres, nous avons évalué ce

que seraient les impacts de l'adoption de la « frugalité » en France (voir les références [16] et [17]), en ligne avec le concept de décroissance à la fois en termes de demande et de technologie. Il s'agit en quelque sorte d'un prolongement des conclusions du rapport « Limit to growth » (halte à la croissance) publié dans les années 1970 : s'appuyant sur leur analyse des résultats du modèle qu'ils avaient conçu pour représenter les effets de la croissance sur le bien-être, les auteurs de ce rapport avaient pu anticiper l'accroissement des pollutions liées à l'activité humaine et leurs conséquences néfastes sur la qualité de la vie.

Dans cette hypothèse de sobriété, la consommation des ménages change dans sa composition et décroît significativement avec le développement de pratiques de mise en commun ; la mobilité longue distance diminue fortement ; les déplacements se reportent en grande partie sur des modes plus doux (vélo, transports en commun, train, etc.) ; l'économie est relocalisée ; l'agriculture devient essentiellement « biologique ». En revanche, les rénovations thermiques dans le secteur résidentiel sont limitées, et les hypothèses d'amélioration de l'efficacité énergétique des processus de production et des équipements des ménages sont, quant à elles, modestes.

Ce scénario impliquerait une diminution de la demande électrique de 56 % entre 2010 et 2050 (voir la Figure 5 de la page suivante).

Lorsque l'on étudie le mix technologique qui pourrait être déployé pour aboutir à cette évolution de la demande, et dans une hypothèse de sortie du nucléaire conjuguée aux options *low tech*, on peut noter que les technologies reposant sur l'usage de ressources fossiles, pourtant peu compatibles avec l'esprit de la décroissance, sont des passages obligés (voir la Figure 6 de la page suivante) ; le bilan émissif de cette vision en est donc pénalisé (voir la référence [17]).

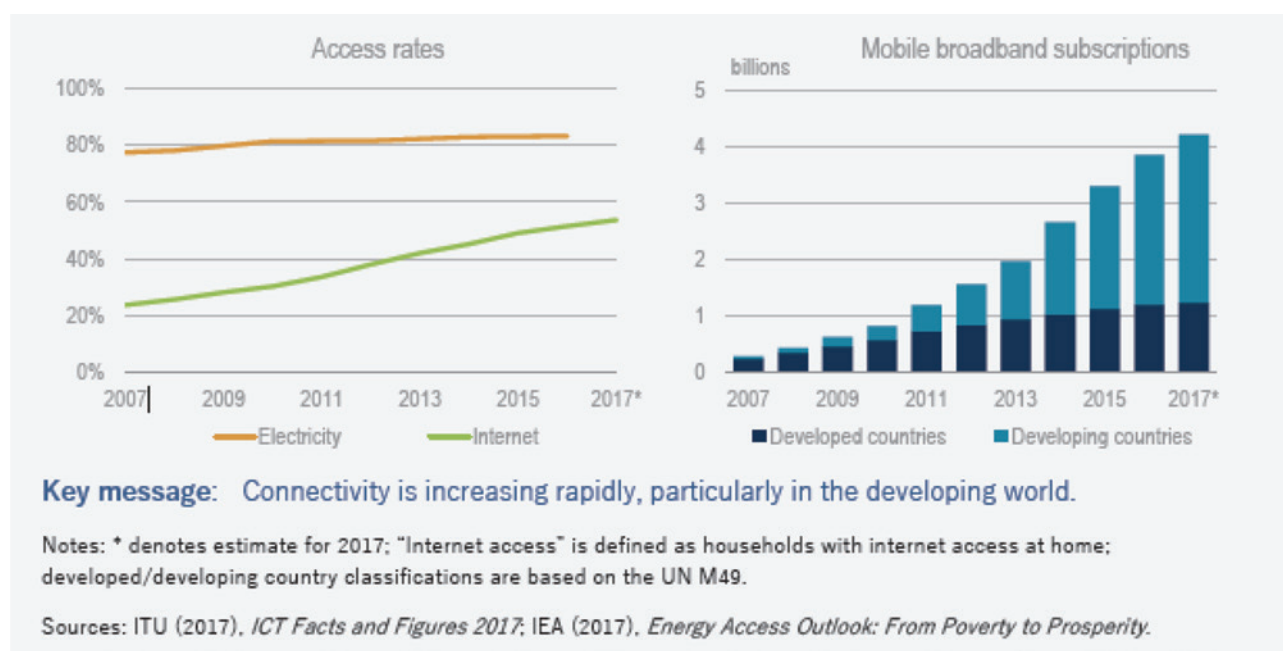


Figure 4 : Évolution de la connectivité (Source : [14]).

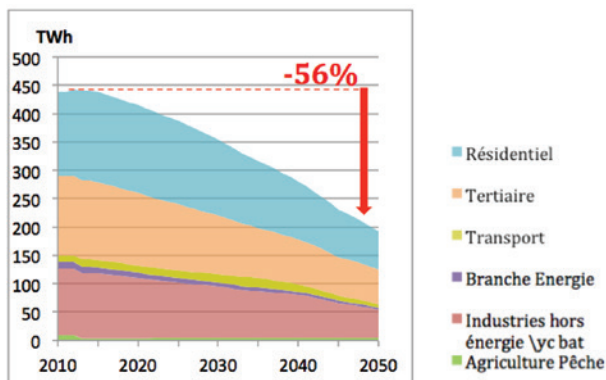


Figure 5 : Évolution de la demande d'électricité associée au scénario décroissance, en France. Une évaluation réalisée à l'aide d'un modèle macro-économique dédié (voir la référence [18]).

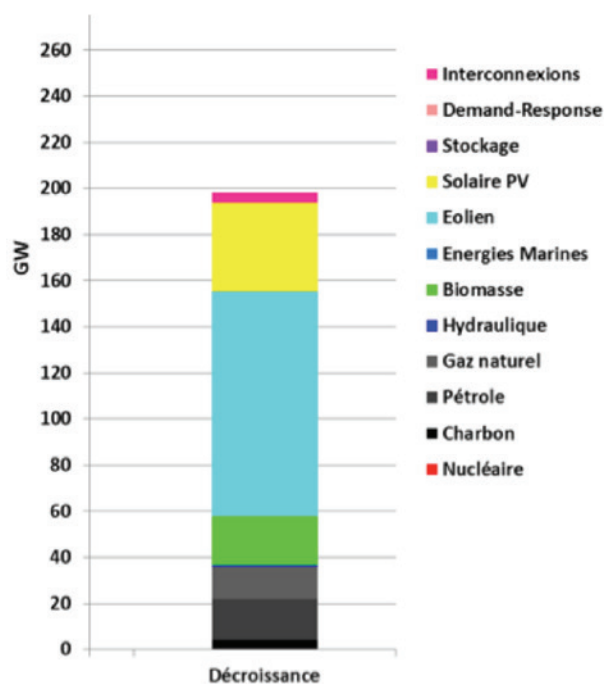


Figure 6 : Cumul des nouvelles capacités installées entre 2012 et 2050 pour un scénario électrique français de « décroissance » (voir la référence [17]).

Enrichir les visions pour mieux éclairer les décisions

Ce que nous avons voulu illustrer dans cet article, c'est que les choix techniques de la transition énergétique sont intimement liés aux choix d'évolution de notre société. Si toutes les solutions sont théoriquement envisageables, des éléments de contexte intangibles ne permettent pas de considérer que l'univers des possibles est complètement ouvert.

Cette exploration de visions du futur techno-centrées ou socio-centrées nous invite à tempérer le « caractère angélique » de ces différents schémas de pensée, en ce que chacun d'eux considère détenir « la » bonne solution.

Finalement, la recommandation que nous tirons de cette analyse est que la création d'un monde sans émissions de gaz à effet de serre est une entreprise qui doit recouvrir une dimension révolutionnaire visant à faire voler en éclats les silos (voir la référence [19]) : il ne s'agit pas simplement de réconcilier l'offre et la demande, il faut aussi les asso-

cié, *a priori* en envisageant les changements nécessaires à la fois en matière sociétale et économique, ainsi que sur le plan des infrastructures et de leurs interactions.

Bibliographie

- [1] SOVACOL B. K. *et al.* (2015), "Integrating social science in energy research", *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 6, pp. 95-99.
- [2] CREUTZIG F. *et al.* (2018), "Towards demand-side solutions for mitigating", *Nat. Clim. Chang.*, vol. 8, Avril, pp. 260-271.
- [3] HIRSH R. F. & JONES C. F. (2014), "History's Contributions to Energy Research and Policy", *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 1, March, pp. 106-111.
- [4] MOBIR M. (2019), "Supportability of an 'All Electric' energy system A prospective study to 2050", report, École des Mines de Paris/Schneider electric, Mastère OSE.
- [5] "WEO 2018", <https://www.iea.org/weo2018/> (consulté le 17 avril 2019).
- [6] PETIT V. (2019), *The New World of Utilities: a historical transition towards a new energy system*, Springer.
- [7] Energy Transitions Commission (2017), "Better Energy, Greater Prosperity", "Achievable pathways to low-carbon energy systems", <http://www.energy-transitions.org/better-energy-greater-prosperity>
- [8] MAZURIC V. & MAÏZI N. (2007), "A global approach of electromagnetism dedicated to further long-term planning", *PAMM*, vol. 7, n°1, December, pp. 2130003-2130004.
- [9] BOUCKAERT S., ASSOUMOU E., SELOSSE S. & MAÏZI N. (2014), "A prospective analysis of waste heat management at power plants and water conservation issues using a global TIMES model", *Energy*, vol. 68, pp. 80-91.
- [10] DUBREUIL A., ASSOUMOU E., BOUCKAERT S., SELOSSE S. & MAÏZI N. (2013), "Water modeling in an energy optimization framework – The water-scarce middle east context", *Appl. Energy*.
- [11] BOUBAULT A., KANG S. & MAÏZI N. (2018), "Closing the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR) Raw Materials Gap with Life Cycle Inventories", *J. Ind. Ecol.*
- [12] BOUBAULT A. & MAÏZI N. (2019), "Devising Mineral Resource Supply Pathways to a Low-Carbon Electricity Generation by 2100", *Resources*, vol. 8, n°1, p. 33.
- [13] Minéralinfo (2018), « La production mondiale d'électricité : une empreinte-matière en transition », <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/production-mondiale-deelectricite-empreinte-matiere-en-transition> (consulté le 17 avril 2019).
- [14] IEA (2017), "Digitalization & Energy", Paris.
- [15] LE GALLIC T. *et al.* (2017), "Future Demand for Energy Services through a Quantitative Approach of Lifestyles", *Energy*, vol. 141, December, pp. 2613-2627.
- [16] BRIENS F. & MAÏZI N. (2014), "Investigating the Degrowth Paradigm through prospective Modeling", *Ökologisches Wirtschaften*, vol. 29, n°3, p. 2.
- [17] MAÏZI N. & BRIENS F. (2018), « Envisager le futur énergétique : des aspirations sociétales aux enjeux techniques », *Reflets la Phys.*, n°60, pp. 49-51.
- [18] BRIENS F. (2015), « La décroissance au prisme de la modélisation prospective : exploration macroéconomique d'une alternative paradigmatique », thèse, École nationale supérieure des Mines de Paris.
- [19] FARMER J. D. *et al.* (2019), "Sensitive intervention points in the post-carbon transition", *Sci. Policy Forum*, vol. 364 (6436), March, pp. 132-134.