

ÉNERGIES UNE TRANSITION À PETITS PAS

1 MAGAZINE + 1 PORTAIL WEB POUR PARTAGER LES SAVOIRS
popsciences.universite-lyon.fr

RENOUVELABLE

La tentation du
tout renouvelable

HYDROGÈNE

Réconcilier environnement
et industrie ?

NUMÉRIQUE

Le numérique menace-t-il la
transition énergétique ?

DÉCHETS NUCLÉAIRES

Nucléaire : les
déchets en héritage

TRANSITION

À catastrophe lente,
transition lente



ÉNERGIES UNE TRANSITION À PETITS PAS

1 MAGAZINE + 1 PORTAIL WEB POUR PARTAGER LES SAVOIRS
popsciences.universite-lyon.fr



Des articles
À LIRE



Des reportages
À REGARDER



Des interviews
À ÉCOUTER

ÉDITO

Énergies fossiles : une fin de règne qui se fait attendre

L'énergie consommée dans le monde provient à plus de 80% de combustibles fossiles. À ce rythme, et dans la perspective d'une planète à 9 voire 10 milliards d'habitants, la plupart des ressources en pétrole, charbon, ou gaz naturel auront disparu d'ici 150 ans, après que leurs stocks naturellement présents dans nos sols se soient taris.

En à peine 3 siècles, depuis la première révolution industrielle, l'espèce humaine aura épuisé les ressources énergétiques dont elle aura eu besoin pour se développer et se moderniser à vitesse exponentielle. Comment s'extirper de cette conviction collective qui consiste à croire que cette surexploitation peut perdurer sans fin ? Et, par la même occasion, mettre un terme aux effets délétères que la combustion de ces énergies fossiles a sur l'environnement et le climat ?

Le défi de la transition énergétique est sur toutes les lèvres, pourtant les moyens de sa mise en œuvre ne font pas consensus.

Un paradoxe subsiste entre, d'un côté, le volontarisme politique affiché en faveur de la transition énergétique et de l'autre, la lente mise en œuvre des alternatives technologiques nécessaires à son accomplissement. Ce nouveau numéro permet de comprendre pourquoi la diminution des combustibles polluants dans le « mix énergétique » est si longue à aboutir.

Quelles nouvelles innovations scientifiques permettraient d'accélérer le mouvement ? Comment inverser la vapeur d'une économie encore très dépendante de la capitalisation sur des ressources fossiles et tarissables ? Enfin, comment peut-on profiter de cette transition pour définir une production d'énergie qui soit plus résiliente, plus acceptée et moins créatrice d'inégalités ?

C'est ce que l'Université de Lyon, au travers de ce nouveau numéro de Pop'Sciences Mag, vous propose de décrypter.

Stéphane Martinot,

Administrateur provisoire de l'Université de Lyon

SOMMAIRE

06

RENOUVELABLE

LA TENTATION DU TOUT RENOUEVABLE

14

HYDROGÈNE

HYDROGÈNE : RÉCONCILIER ENVIRONNEMENT ET INDUSTRIE



28

DÉCHETS NUCLÉAIRES

NUCLÉAIRE : LES DÉCHETS EN HÉRITAGE

22

NUMÉRIQUE

LE NUMÉRIQUE MENACE-T-IL LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?



36

TRANSITION

À CATASTROPHE LENTE, TRANSITION LENTE ?



ÉNERGIE ET TRANSITION. DE QUOI PARLE-T-ON ?

Le principe physique initial définit l'énergie comme la « *capacité d'un corps ou d'un système à produire du travail mécanique ou son équivalent* »¹. C'est-à-dire que nous exploitons autant l'énergie pour actionner les corps, que pour transformer notre environnement, ou changer la vitesse, la forme, ou encore la température des matières.

L'énergie que nous exploitons est soit issue de la maîtrise d'éléments naturels (le vent, l'eau, le soleil), soit elle nous est fournie par un carburant issu de l'exploitation de ressources fossiles (gaz, pétrole, charbon...) ou d'origine nucléaire. Depuis la première révolution industrielle et jusqu'à l'automatisation et la numérisation de nos systèmes productifs nous avons « optimisé » notre capacité de travail et notre productivité comme jamais et toute l'humanité est désormais dépendante d'un apport en énergie toujours croissant. Elle est devenue le principe actif et fondamental de nos sociétés post-modernes.

Pourtant, la production, le transport et la consommation d'énergie ont des impacts environnementaux et climatiques si néfastes que

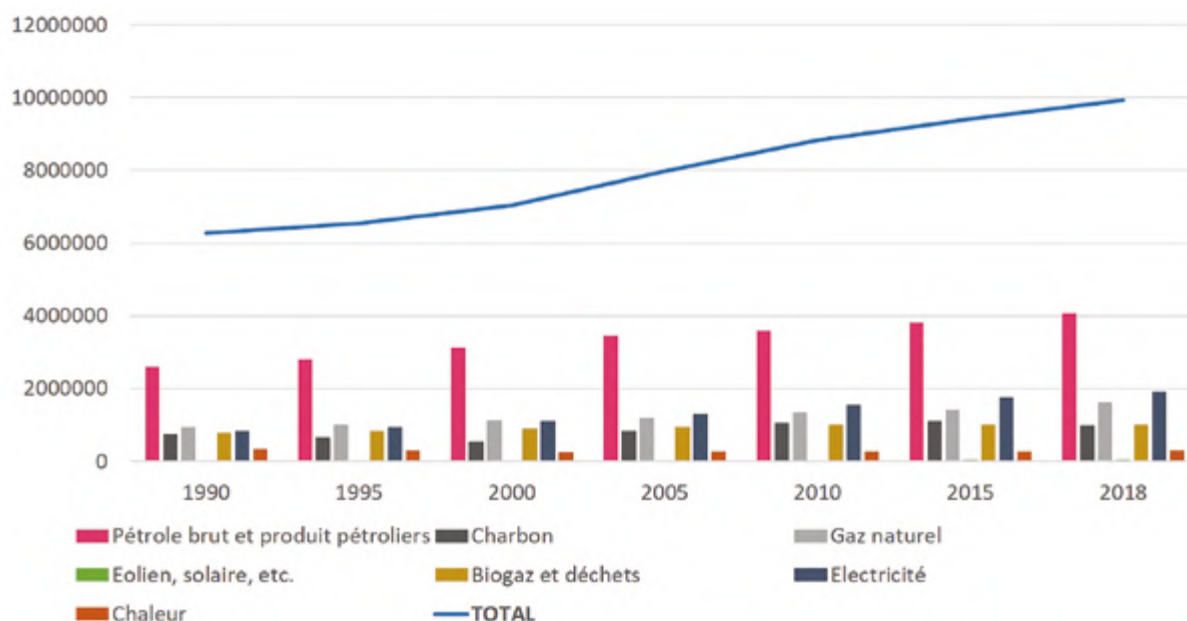
la pierre angulaire de la transition écologique, à laquelle se sont engagés les États participants à la COP-21 (2015), consiste en une reconversion massive du modèle énergétique mondial.

Pour y parvenir, les outils de la transition énergétique sont nombreux (voir ci-contre). Cela passe en particulier par le développement de sources renouvelables et/ou moins polluantes : hydroélectrique, solaire, éolien, biomasse... Mais, bien qu'elles se développent, ces énergies « décarbonées » ne parviennent pas encore à subvenir à l'ensemble des besoins de la planète. Loin de là : elles ne pèsent en 2019 que 11,5% de la production mondiale d'énergie. La transition n'aboutira donc pas par la seule inversion du mix-énergétique mondial. Pour y arriver, il faut également agir sur l'efficacité énergétique des bâtiments, la mobilité durable, la fiscalité ou encore sur la quantité d'énergie que nous consommons.

Reste à déterminer quelles seront les conséquences sociales, environnementales, politiques et économiques d'une telle transformation.

1 > Définition du Trésor de la langue française informatisé (CNRTL)

Consommation finale d'énergie dans le monde, en tonne d'équivalent pétrole (tep)* (source : IEA)



* La tonne d'équivalent pétrole (tep) représente la quantité d'énergie contenue dans une tonne de pétrole brut, soit 41,868 gigajoules. Cette unité est utilisée pour exprimer dans une unité commune la valeur énergétique des diverses sources d'énergie. (INSEE)

9 TRANSFORMATIONS POUR ACCÉLÉRER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

La réduction des effets négatifs que le secteur des énergies a sur l'environnement et le climat, passe par des évolutions techniques, sociales, économiques et politiques.

MOINS CONSOMMER



Sobriété et réduction de la consommation d'énergie



Amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et des industries



Développement de la mobilité durable (transports en communs, carburants « verts » ...)

MIEUX PRODUIRE



Inversion du mix énergétique mondial



Amélioration du stockage des énergies produites



Évolution vers des systèmes énergétiques moins centralisés

ENCOURAGER LA TRANSFORMATION



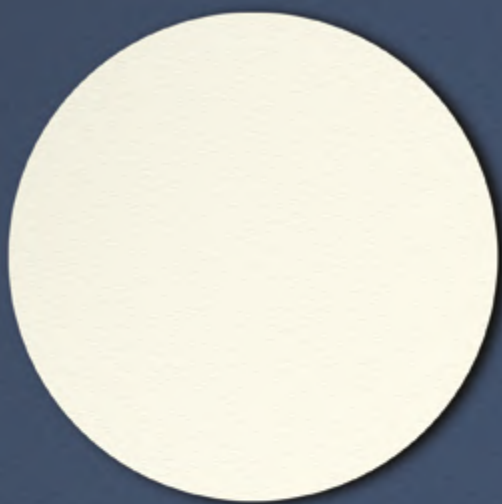
Obligation de respect des objectifs de développement durable définis par l'Accord de Paris en 2015



Développement d'une plateforme internationale de coopération et de solidarité



Incidations fiscales à la transition énergétique (aides à la rénovation, taxes carbone ...)



06


RENOUVELABLE

LA TENTATION DU TOUT RENOUVELABLE

Par Grégory Flechet

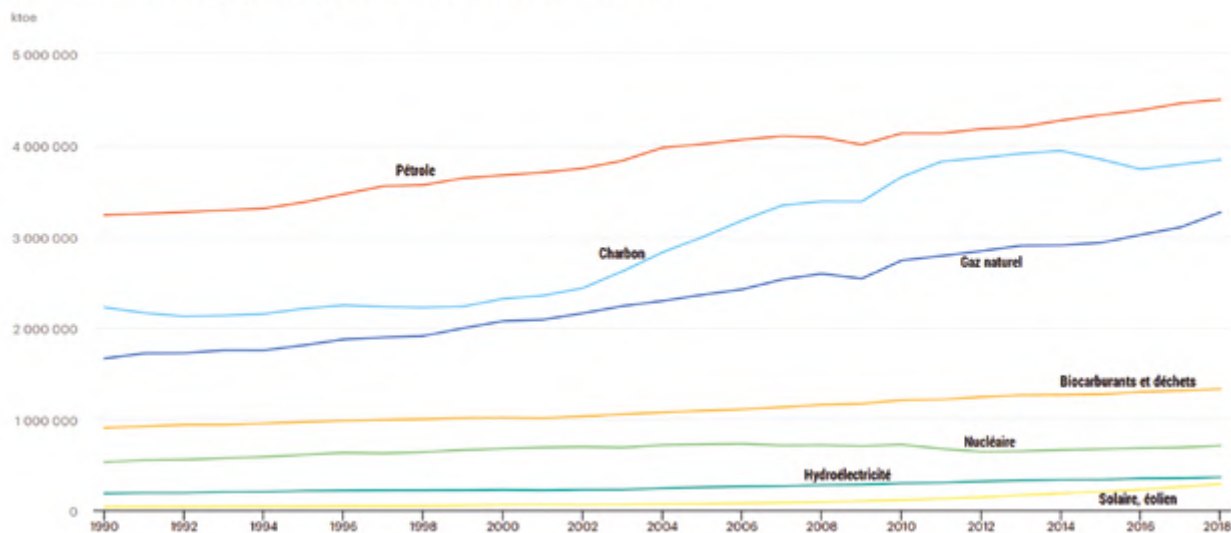
Alors que les effets du réchauffement climatique se font chaque année un peu plus visibles, le recours massif aux énergies vertes est une stratégie sur laquelle mise désormais un grand nombre de pays pour réduire au plus vite leurs émissions de gaz à effet de serre. Devant l'impérieuse nécessité de décarboner l'économie mondiale, n'est-il pas pour autant illusoire d'espérer faire reposer la transition écologique sur les seules énergies renouvelables ?

Longtemps dénigrées en raison de leur faible rendement et du caractère fluctuant de leur production, les énergies renouvelables ont désormais le vent en poupe dans la constitution du mix énergétique de nombreux pays. Comme le souligne l'Agence internationale de l'énergie renouvelable (Irena)¹ dans un récent rapport, l'ensemble des énergies solaires et éoliennes devrait atteindre une capacité installée de 14500 gigawatts (GW) à l'horizon 2050, contre un peu plus de 1200 GW aujourd'hui. En ajoutant l'hydroélectricité, la production d'énergies renouvelables serait alors en mesure de satisfaire plus de 85% de la demande mondiale en électricité. Ces prévisions pour le moins optimistes doivent toutefois être mises en regard de la consommation mondiale d'énergie qui repose encore

aujourd'hui à 80% sur l'inévitable triptyque : charbon/pétrole/gaz. Malgré le déploiement tous azimuts de parcs éoliens et de fermes photovoltaïques, notre économie et nos modes de vie restent donc très largement tributaires des ressources fossiles. Comment, dans ce contexte, mettre en œuvre une transition accélérée vers les renouvelables ? Pour Marc Jedliczka, directeur général de l'association lyonnaise Hespul qui milite pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, il s'agit tout d'abord de repenser notre rapport à l'énergie: « *Il faut cesser de raisonner en termes de production pour se concentrer sur la notion de services énergétiques afin de limiter les usages de l'énergie à nos besoins les plus essentiels* », plaide-t-il. 

1 > "Global energy transformation: A roadmap to 2050", Agence internationale de l'énergie renouvelable, 2019.

Approvisionnement énergétique total par source, dans le Monde entre 1990-2018 Source : IEA



› Le nécessaire renforcement de l'efficacité énergétique

2 > Association fondée en France en 2001, négaWatt promeut le "négawatt" comme l'unité théorique de la puissance électrique économisée.

3 > Les Accords de Paris signés en 2015 définissent la neutralité carbone comme le moment où l'on « parvient à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre ».

4 > La performance d'une cellule photovoltaïque est déterminée par sa capacité à convertir la plus grande part possible de la lumière qu'elle reçoit en électricité.

Selon le dernier scénario négaWatt² publié en 2017, auquel souscrit l'association Hespul, il serait parfaitement envisageable, en France, d'atteindre 100% d'énergies renouvelables d'ici 2050 tout en parvenant à la neutralité carbone.³ Un tel basculement impliquerait toutefois de diviser par deux notre consommation d'énergie, la montée en puissance des énergies vertes (solaire, éolien, bois, ...) permettant de satisfaire les besoins restants. Ce scénario de transition reste par ailleurs indissociable d'un renforcement de l'efficacité énergétique dans de nombreux domaines à commencer par celui du bâtiment. « *Sachant que plus de 40% de la consommation d'énergie finale et 30% des émissions de gaz à effet de serre proviennent de ce secteur, il est indispensable de faire de l'isolation des bâtiments une priorité nationale* », constate Marc Jedliczka. En matière de production énergétique, la stratégie négaWatt mise principalement sur l'éolien et le photovoltaïque qui disposent d'un fort potentiel de développement dans notre pays. Ces deux technologies présentent en outre un bilan carbone satisfaisant tout en offrant l'avantage d'être facilement recyclables. Une éolienne terrestre par exemple, dont la durée de vie moyenne se situe autour de 30 ans, produit en une année assez d'énergie pour compenser celle qui a été dépensée pour sa fabrication. Une fois démantelée, plus de 90 % des matériaux qui la constituent peuvent ensuite être réutilisés. De ce point de vue, le solaire photovoltaïque fait encore mieux. Selon PV-Cycle, une organisation dédiée au recyclage des panneaux solaires en Europe, 95% d'un panneau solaire à base de silicium, la technologie qui équipe actuellement la plupart des installations photovoltaïques, peut être recyclé.



« Sachant que plus de 40% de la consommation d'énergie finale et 30% des émissions de gaz à effet de serre proviennent de ce secteur, il est indispensable de faire de l'isolation des bâtiments une priorité nationale »

Marc Jedliczka

Directeur général de l'association lyonnaise Hespul.

Une ressource largement sous-exploitée

Sur le plan de la performance, le solaire photovoltaïque continue aussi de progresser. « *Alors qu'il y a encore quelques années, on pensait qu'un taux de conversion⁴ de la lumière en électricité de 25% constituait un plafond de verre pour la technologie à base de silicium, les modules photovoltaïques les plus performants atteignent désormais un rendement de 27%. Si les investissements en matière de recherche et développement sont au rendez-vous, il n'est pas illusoire d'espérer dépasser 30% de rendement à l'horizon 2030* », souligne Mohamed Amara, chercheur CNRS à l'Institut des nanotechnologies de Lyon (INL) spécialiste du développement des technologies photovoltaïques. Compte tenu de sa situation géographique, la France jouit par ailleurs d'un niveau d'ensoleillement suffisant sur l'ensemble de son territoire, autorisant ainsi l'exploitation de ce gisement à très grande échelle. Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), le seul potentiel inexploité des toitures avoisinerait 360 GW au niveau national. C'est presque trois fois plus que la puissance installée de l'ensemble du parc de production électrique français. La réalité actuelle du secteur photovoltaïque est pourtant nettement moins radieuse. Fin 2019, la puissance totale installée dans l'hexagone représentait en effet un peu moins de 10 GW soit à peine de quoi couvrir 2% de notre consommation d'électricité.

Selon Marc Jedliczka, cette forme d'apathie serait en partie liée à la prépondérance du nucléaire dans notre mix énergétique : « *Le fait que cette source d'énergie, que l'on considère comme décarbonée, couvre plus de 70% de notre consommation d'électricité limite fortement les possibilités de croissance de l'énergie solaire tout comme de l'éolien.* » La structuration de notre réseau électrique constitue un autre obstacle au développement des énergies renouvelables. Depuis sa création, au sortir de la seconde guerre mondiale, celui-ci repose sur un mode de fonctionnement très centralisé. Produite majoritairement à partir de centrales nucléaires de forte puissance, l'électricité est ensuite acheminée vers les principaux sites de consommation que sont les agglomérations ou les zones industrielles.

Vers un retour en grâce du courant continu

Le modèle de distribution centralisé, qui prévaut dans la plupart des pays européens, se révèle peu adapté à l'intégration des énergies renouvelables. L'éolien et le solaire photovoltaïque s'appuient en effet sur une myriade de petites unités de production souvent implantées à l'écart des grands réseaux électriques. Le niveau de production d'un parc éolien ou photovoltaïque a en outre tendance à fluctuer en fonction de la météo et des saisons. En l'absence d'un système efficace de stockage de l'électricité, la montée en puissance des énergies renouvelables

sur le territoire européen pourrait conduire à des situations de surproduction ou de pénurie. « *Pour pallier ces inconvénients, il est indispensable d'améliorer l'interconnexion entre les grands réseaux de distribution nationaux* », assure Bruno Luscan, directeur technique de SuperGrid Institute. Ce centre de recherche et d'innovation basé à Villeurbanne développe des solutions technologiques destinées à favoriser l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux d'électricité en s'appuyant notamment sur le courant continu à très hautes tensions (CCHT). « *À la différence du courant alternatif à très hautes tensions, le CCHT permet d'acheminer l'électricité sur de longues distances tout en limitant les déperditions énergétiques* », précise Bruno Luscan. Cette technologie s'avère ainsi particulièrement adaptée au transport de l'électricité lorsque celle-ci provient d'unités de production très dispersées comme cela est le cas avec l'éolien et le solaire photovoltaïque. À l'heure où l'Union européenne entend faire de l'éolien en mer le pilier principal de sa transition énergétique, en annonçant vouloir déployer d'ici 2050 l'équivalent de 450 GW d'éoliennes off-shore le long de son littoral, la technologie CCHT pourrait même devenir incontournable comme le souligne le directeur technique de SuperGrid Institute : « *les câbles à courant continu sont aujourd'hui les seules solutions technologiques disponibles pour transporter de l'électricité sous l'eau et sur de longues distances.* » ➔ [suite p.12](#)



©Terre et Lac

> D'ici 2030, la Métropole de Lyon veut multiplier par dix sa production d'électricité issue de l'énergie solaire, en équipant notamment les toits et les parkings des entreprises de panneaux photovoltaïques.

10

PRODUIRE DU GAZ VERT EN FAISANT FEU DE TOUT BOIS

C'est en plein cœur de la vallée de la chimie, dans le sud de l'agglomération lyonnaise, que le groupe Engie a choisi d'installer une structure de recherche et développement unique en Europe. Cette plateforme semi-industrielle baptisée Gaya vise à valider le modèle technologique et économique de la filière de production de biométhane, à partir d'une large variété de résidus issus de la biomasse sèche. Ce démonstrateur préfigure les futures usines de production de ce gaz renouvelable dont le premier exemplaire pourrait être déployé à l'horizon 2023.



© Gautier Dufau

Implantée sur la commune de Saint-Fons, la plateforme Gaya a commencé à produire ces premiers mètres cubes de biométhane il y a tout juste un an. Le gaz généré par ce démonstrateur semi-industriel est en partie utilisé pour chauffer les locaux administratifs qui jouxtent l'installation.



Une fois débarrassée de ses impuretés, la biomasse est acheminée à l'aide d'un tapis roulant jusqu'au sommet de l'installation où elle vient alimenter un gazéifieur.

Après avoir été introduite dans le gazéifieur, la biomasse est portée à plus de 800°C. Le chauffage à très haute température permet de convertir cette matière première en un mélange gazeux constitué de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂), de dihydrogène (H₂) et de méthane (CH₄). Ces molécules passent ensuite par une étape de filtration avant d'être recombinées à l'aide de catalyseurs. C'est cette réaction, dite de méthanation, qui permet de produire du biométhane en grande quantité.



Chaque étape du processus de production du biométhane est scrutée à distance depuis la salle de contrôle. Des paramètres comme les niveaux de température et de pression ou le taux d'humidité de la biomasse utilisée sont ainsi mesurés en temps réel.

Les granulés de bois comptent parmi les composés d'origine végétale susceptibles d'alimenter la plateforme Gaya, au même titre que les résidus issus de l'industrie papetière, les débris de palettes ou bien encore les noyaux d'olive concassés. Avec une tonne de cette biomasse sèche, Gaya peut produire jusqu'à 600m³ de biométhane.



À l'aide d'une caméra thermique, un technicien de la plateforme Gaya passe en revue le complexe réseau de canalisations de l'installation. Ce type d'inspection vise à repérer les éventuelles zones de déperdition de chaleur susceptibles de limiter le rendement de production du biométhane.



Gaya dispose de son propre laboratoire dédié à l'étude des résidus solides et liquides prélevés tout au long de la chaîne de production. Leur analyse par chromatographie permet notamment de caractériser les différentes molécules chimiques générées à chaque étape du processus industriel.

› Les renouvelables à l'épreuve du réchauffement

Au-delà des défis techniques et industriels qui accompagnent leur déploiement à grande échelle, les énergies renouvelables n'échappent pas à la menace du réchauffement climatique. Au sein de la Compagnie nationale du Rhône qui gère l'aménagement hydroélectrique de Pierre-Bénite (près de Lyon), on estime par exemple que le niveau de production de la centrale devrait diminuer de 20 à 40% d'ici 2050 en raison de la baisse progressive du débit du Rhône. Comme d'autres cours d'eau prenant leur source en haute montagne, le plus puissant fleuve de France subit les conséquences de la fonte précoce du manteau neigeux et du glacier qui lui donne naissance. Résultat : son débit tend à augmenter en hiver mais baisse significativement le reste de l'année faute de précipitations. Or, pour une centrale hydroélectrique au fil de l'eau comme celle de Pierre-Bénite, ces fluctuations sont impossibles à anticiper en l'absence de lac de retenue permettant un stockage saisonnier de la ressource en eau. « À cause de la diminution progressive du débit de la majorité des cours d'eau français,



« les câbles à courant continu sont aujourd'hui les seules solutions technologiques disponibles pour transporter de l'électricité sous l'eau et sur de longues distances. »

Bruno Luscan

Directeur technique du centre de recherche et innovation SuperGrid Institute.

*l'hydroélectricité ne sera pas en mesure de contribuer à plus de 10% au scénario négaWatt prévoyant d'utiliser 100% d'énergies renouvelables en 2050 », précise Marc Jedliczka. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, réchauffement climatique et énergie solaire ne font pas non plus bon ménage. « La température optimale de fonctionnement d'un panneau solaire se situe autour de 25°C, rappelle Mohamed Amara. Au-dessus de ce seuil, chaque augmentation de 1°C provoque une baisse de production électrique de l'ordre de 0,4%. » Sous des températures ambiantes de 35°C, ce qui pourrait devenir la norme en été dès la seconde moitié de ce siècle, les cellules photovoltaïques peuvent atteindre 80°C en surface et perdre ainsi jusque 30% de leur rendement. L'éolien pourrait finalement être l'une des rares sources d'énergies renouvelables à tirer profit du changement climatique. Plusieurs études scientifiques ont en effet montré que celui-ci s'accompagne d'un renforcement progressif de la vitesse des vents dans de nombreuses régions du monde. Selon un article publié en 2019 dans la revue *Nature Climate Change*⁵, la production d'énergie éolienne pourrait ainsi augmenter de 37% d'ici 2024.*



© CNR

Mise en service en 1966 en aval de Lyon, la centrale hydroélectrique de Pierre-Bénite fournit chaque année environ 450 000 mégawattheures d'électricité, soit la moitié de l'électricité renouvelable produite tous les ans à l'échelle de l'agglomération lyonnaise.



Section de câble haute tension dédié au transport de l'électricité en courant continu

Si les énergies renouvelables ne sont pas exemptes de défauts, elles semblent malgré tout à même de répondre aux grands enjeux du 21^e siècle que sont le réchauffement climatique global, l'épuisement des ressources naturelles ou la pollution atmosphérique. À la fois peu coûteuses et faiblement émettrices de gaz à effet de serre, ces sources d'énergie inépuisables laissent entrevoir un avenir moins sombre à condition de se donner les moyens de les développer massivement.

5 > Zeng Z. et al. « A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production », *Nature Climate Change*, 2019

LE GRAND LYON AU DÉFI DE LA TRANSITION

Tandis qu'éoliennes et panneaux solaires essaient dans la plupart des campagnes d'Europe, l'intégration des énergies renouvelables se révèle plus délicate en milieu urbain. Les grandes agglomérations doivent en effet composer avec la forte densité démographique de leur territoire et le manque de foncier disponible pour élaborer leur transition énergétique. À l'échelle de la Métropole de Lyon, cette stratégie est définie par le schéma directeur des énergies. « Cette feuille de route opérationnelle prévoit de réduire notre consommation d'énergie de 20% d'ici 2030, tout en portant la part des renouvelables dans notre mix énergétique à 17%, soit le double de sa contribution actuelle », détaille Blandine Melay directrice de la mission énergie de la Métropole de Lyon. Faute d'espace suffisant pour développer à grande échelle le solaire photovoltaïque ou l'éolien, l'agglomération mise avant tout sur la progression du chauffage au bois individuel et collectif ainsi que sur le renforcement de ses réseaux de chaleur urbains pour réduire son bilan carbone. Dans cette même perspective, le Grand Lyon envisage de mettre à contribution les entreprises de la vallée de la chimie, vaste zone industrielle située au sud de l'agglomération, pour capter la chaleur fatale* émanant de leurs activités. « Ce projet qui s'inscrit dans une logique d'économie circulaire devrait aboutir, d'ici 2026, à la création d'un système de canalisations permettant de récupérer les calories générées par tout un ensemble de processus industriels afin de les rediriger vers les réseaux de chaleur des villes voisines », détaille Julien Lahaie, directeur de la mission Vallée de la chimie du Grand Lyon. Pour espérer atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, la collectivité territoriale est aussi en train de mettre en place une stratégie d'achat public d'énergies renouvelables de plus long terme dans le but de maximiser son approvisionnement d'électricité et de gaz verts. « S'inscrire dans une trajectoire de décarbonation en misant sur le développement des renouvelables impliquera de diminuer radicalement notre consommation d'énergie », conclut Blandine Melay.

* > Chaleur générée indirectement par un processus industriel et qui n'est ni récupérée, ni valorisée.

POUR ALLER + LOIN :

popsociences.universite-lyon.fr/le_mag




À ÉCOUTER
Interview vidéo
d'Olivier Labussière

Bibliographie

Dictionnaire critique de l'anthropocène, CNRS Editions, 2020.

De Gerlache J. "Mettre en œuvre les transitions énergétiques", Dunod, 2019.

Salomon T. Jedliczka M. "Changeons d'énergies", Actes Sud, 2013.



14


HYDROGÈNE

HYDROGÈNE : RÉCONCILIER ENVIRONNEMENT ET INDUSTRIE ?

Par Cléo Schweyer

Sauver l'emploi en même temps que la planète, c'est la mission officielle de l'hydrogène, un gaz présenté comme la solution idéale pour verdir l'industrie et le transport tout en relançant l'activité industrielle. Mais l'hydrogène ne fera pas à lui seul la transition énergétique, avertissent les experts : il n'est pertinent que pour un nombre limité d'usages.

Petit atome, grandes promesses. Il y a encore quelques années, la prudence, voire la méfiance, étaient de mise face à l'avènement annoncé de l'« économie hydrogène »¹. Aujourd'hui, l'heure est aux investissements : d'ici 2030, 7 milliards d'euros doivent être consacrés par l'État français au développement d'une filière hydrogène, dont 2 milliards dès 2021-2022. Et les collectivités locales s'y mettent aussi, Auvergne-Rhône-Alpes en tête. La Région se rêve en « *premier territoire hydrogène de France* » et prévoit

un investissement de 70 millions d'euros sur 10 ans (dont 10 millions d'euros de financements européens et 15 millions de la région elle-même) pour développer son écosystème local. Baptisé *Zero Emission Valley*, (vallée sans émissions de CO²), le projet met l'accent sur la mobilité et le transport. Il repose sur l'implantation de vingt stations de recharge à hydrogène, le long d'un axe reliant le Puy-de-Dôme aux deux Savoie. 1000 véhicules doivent être également financés pour assurer la rentabilité de ces stations. 

1►. L'expression est empruntée au célèbre ouvrage de Jeremy Rifkin, *L'économie hydrogène. Après la fin du pétrole, la nouvelle révolution économique*, paru en 2002. Il y présente l'hydrogène comme le fondement d'une « nouvelle ère énergétique » dans le contexte de l'épuisement des ressources pétrolières. L'ouvrage avait reçu en France un accueil assez froid.

› Mobilité hydrogène : l'œuf et la poule

Des véhicules sans émission de carbone, plus pratiques à l'usage que les véhicules électriques actuels, avec en prime la création de nouvelles activités économiques ? C'est l'argument en or des promoteurs de la mobilité hydrogène. Mais pour tenir ses promesses, le développement de la mobilité hydrogène doit surmonter un premier dilemme, celui de « l'œuf et de la poule », une expression qui revient chez tous les acteurs du secteur. Pourquoi produire des véhicules à hydrogène² si l'utilisateur ne peut pas les recharger facilement ? Et à l'inverse, pourquoi implanter des stations de distribution si personne n'en a besoin ? « *Le développement de la mobilité hydrogène ne peut se faire que par écosystème, comme ce fut le cas en son temps pour la voiture à essence* », résume Bruno Faivre d'Arcier, professeur émérite au Laboratoire Aménagement Economie Transport (Université Lumière-Lyon 2 / Ecole Nationale des Travaux Publics et de l'Environnement).

La mobilité hydrogène repose aujourd'hui sur trois volets, que les investissements annoncés doivent développer en parallèle : la production d'hydrogène, sa distribution (qui nécessite des infrastructures), et son déploiement à travers la construction et la mise en circulation de véhicules à hydrogène. Ces derniers présentent un avantage de taille sur le véhicule électrique à batterie : l'énergie électrique est ici fournie par un système embarqué (voir note 2). On recharge régulièrement la pile en hydrogène, comme on remplit son réservoir de carburant. L'opération prend trois à cinq minutes, contre plusieurs heures pour la recharge d'une batterie électrique. Autre avantage : alors qu'un camion ou un train

électrique à batterie seraient sans intérêt, car la batterie occuperait une trop grande partie de l'espace disponible, la pile à combustible, se révélerait quant à elle bien plus adaptée au transport collectif et de marchandises du fait de sa taille relativement réduite.

L'hydrogène serait donc la technologie idéale pour le transport individuel comme collectif ou de marchandises ? Pas si simple.

Un ensemble de freins à lever

Deux catégories d'objections sont soulevées par les sceptiques de la mobilité hydrogène : d'une part celles ayant trait à la technologie elle-même ; d'autre part celles qui remettent en cause l'idée que la mobilité soit le meilleur usage possible de l'hydrogène.

Côté technologie, la pile à combustible n'est pas sans points faibles. « *L'hydrogène est le plus léger des gaz, il est donc très volatil* », souligne ainsi Nolven Guilhaume, chercheuse à l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (Ircelyon). Cette faible masse entraîne une contrainte de stockage et de transport : il faut le compresser fortement (700 bar dans des applications automobiles, soit environ 700 fois la pression atmosphérique) pour réduire son volume de stockage. Ceci implique des matériaux très coûteux pour le réservoir de stockage (à ces pressions, les aciers n'offrent pas une résistance suffisante) et un

« Le développement de la mobilité hydrogène ne peut se faire que par écosystème, comme ce fut le cas en son temps pour la voiture à essence »

Bruno Faivre d'Arcier

Professeur émérite en urbanisme au Laboratoire Economie Transport Environnement.

2> Véhicule électrique produisant sa propre électricité, grâce à une pile à combustible. La pile à combustible oxyde le dihydrogène contenu dans un réservoir avec le dioxygène de l'air, produisant ainsi de l'électricité et de la vapeur d'eau.



« L'hydrogène est le plus léger des gaz, il est donc très volatil »

Nolven Guilhaume

Chercheuse à l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (Ircel Lyon).

risque de fuite. Or, l'hydrogène s'enflamme facilement. Pour Nolven Guilhaume, les risques d'explosion accidentelle lors du remplissage, voire d'une collision entre deux véhicules, sont donc réels. Intégrer ce risque limiterait d'emblée l'usage des véhicules à hydrogène à des vitesses réduites, et impose de toute manière des normes de sécurité drastiques.

Autre frein au développement de la mobilité hydrogène, et non des moindres car il nuance ses vertus environnementales : le coût financier et environnemental élevé du transport de l'hydrogène. Sous 200 bar de pression, une bonbonne de gaz en acier pesant 70 kg à vide et mesurant 1,80 m contient seulement 900 g d'hydrogène (les stations de la *Zero Emission Valley* distribueront environ 200 kg d'hydrogène par jour). Alimenter une station nécessite donc le recours intensif à du transport terrestre, particulièrement émetteur de CO₂. À moins que les camions ne roulent eux-mêmes à l'énergie renouvelable, ou qu'un réseau de distribution similaire à celui du gaz de ville ne soit déployé, le bénéfice pour l'environnement peut rapidement s'avérer nul. D'autant plus que l'hydrogène est loin d'avoir un bilan carbone neutre.

Priorité à la production d'hydrogène vert

La production d'hydrogène, aujourd'hui destinée principalement à l'industrie (raffinage du pétrole ou production d'engrais chimiques par exemple), est obtenue à 95% par un procédé polluant : le vaporeformage (réaction entre de la vapeur d'eau et un combustible fossile comme le pétrole, le charbon, ou le gaz naturel)³. Elle est ainsi responsable de 3 % des émissions françaises de CO₂. Pour Marc Jedliczka, porte-parole de NegaWatt, une ONG active dans le domaine de l'énergie, « *le premier enjeu aujourd'hui n'est pas la mobilité verte : c'est décarboner l'hydrogène industriel* ». La solution est connue : produire de l'hydrogène à partir d'électricité **issue d'énergies renouvelables**.

Mais la France est à la traîne en la matière : « *Il faudrait multiplier par trois ou quatre la production actuelle d'électricité verte pour être à la hauteur des objectifs que la France s'est fixés* », déplore Marc Jedliczka. Pour accroître la production et répondre à une demande supplémentaire due aux nouvelles mobilités vertes, il faut donc développer des infrastructures. Frédéric Stork, directeur de la transition énergétique et de l'innovation à la Compagnie Nationale du Rhône, qui fournit de l'hydrogène vert pour les stations lyonnaises, précise : « *L'objectif de la France est de produire 6000 MWh d'énergie hydrogène issue du renouvelable en 2030. Cela représente environ 9000 hectares de parcs éoliens et solaires en plus.* » Et ce n'est pas tout, renchérit Marc Jedliczka : « *Tant qu'il n'y aura pas une taxe carbone bien conçue, c'est-à-dire au juste prix et prévoyant une redistribution pour limiter son impact sur les ménages, l'hydrogène vert restera plus cher que l'hydrogène carboné. Le photovoltaïque, lui, est aujourd'hui aussi compétitif que le charbon.* » Pourquoi, dans ce cas, ne pas continuer à utiliser des véhicules à batteries électriques ? ➔ [suite p.20](#)



À LIRE
→ P. 07

La tentation du tout renouvelable

3> Lorreyte C.
Comment rendre le carburant hydrogène plus écologique ? The Conversation, oct. 2019

HYDROGÈNE : QUI FAIT QUOI À LYON-SAINTE-ÉTIENNE ?

Auvergne-Rhône-Alpes se rêve en premier « territoire hydrogène » de France à l'horizon 2030. Le plan « Zero Emission Valley » (ZEV) a pour objectif de doter la région d'un écosystème hydrogène complet : production (la région représente déjà les deux-tiers de la capacité nationale), distribution, déploiement de véhicules à pile à combustible. ZEV entend assurer des débouchés aux acteurs industriels qui se lancent dans l'aventure par la création de points de production et de distribution et l'acquisition d'une flotte de 1000 véhicules, pour usage collectif (entreprises et collectivités publiques). ZEV a été le premier projet français financé par l'Union Européenne, à hauteur de 10 millions d'euros sur les 70 millions d'euros du total : en effet, bon nombre d'acteurs clé de la région ont déjà fait leurs preuves. Zoom sur le bassin Lyon-Saint-Etienne.





Recherche et développement : La recherche fondamentale et la recherche et développement sont indispensables au développement d'une filière hydrogène. Parmi les objectifs poursuivis : réduire le coût de la pile à combustible hydrogène à 30 000 euros en 2023 (contre environ 50 000 euros actuellement), et augmenter sa durée de vie, d'environ 6 000 heures actuellement à 7 000 heures en 2023. Enfin, le développement de techniques de production d'hydrogène, "propres" et compétitives par rapport à l'éolien et au photovoltaïque, est une priorité incontournable.



Production d'hydrogène : Himpulsion est la clé de voûte de Zero Emission Valley, le plan hydrogène de la Région. C'est une société détenue d'un côté par des partenaires publics (Région Auvergne-Rhône-Alpes pour 33 %, Banque des Territoires pour 16 %) et de l'autre par des partenaires privés (Groupe Michelin pour 22,8%, Engie pour 22,8%, Crédit Agricole pour 4,4%). Le groupe doit assurer l'essentiel de la production, ainsi que l'approvisionnement des stations de distribution. Objectif : aucune zone sans distribution et un prix unique sur tout le territoire.



Distribution : Ouvert à l'automne 2020 à côté du Port de Lyon, le Quai des Energies est une station grand public d'énergies vertes créée par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) : gaz GNV, électricité verte et hydrogène. On peut venir y recharger son véhicule comme dans une station classique. L'électricité et l'hydrogène sont produits par des énergies renouvelables issues des installations de la CNR. Des bornes de recharge électrique pour le transport fluvial seront déployées dans un deuxième temps.



Déploiement : Lancée en 2010, Symbio est une joint-venture entre Michelin, le fabricant de pneumatique, et Faurecia, équipementier automobile. Un pari réussi pour cette ancienne start-up grenobloise exploitant une technologie issue du centre CEA de Grenoble, et qui, faute de partenaires a équipé et vendu ses propres véhicules de 2014 à 2018. Elle a fourni la première flotte d'entreprise à hydrogène, testée à Lyon de 2015 à 2018, lors de la phase 1 du projet HyWay, précurseur de Zero Emission Valley. L'entreprise emploie aujourd'hui 300 salariés et fournit des piles à combustibles pour toute une gamme de véhicules, de la mobilité individuelle au transport de marchandises. Elle ouvrira à Saint-Fons la plus grosse usine de piles à combustible d'Europe, en janvier 2021.

› Des perspectives de développement local

Coûteuse à fabriquer, nécessitant des investissements importants en amont pour la production et la distribution de l'hydrogène : la voiture individuelle à hydrogène n'est pas pertinente pour la transition énergétique, estiment les experts. À moins de parcourir plusieurs centaines de kilomètres par jour, les bilans carbone et financier au kilomètre sont moins bons que les véhicules existants : les flottes d'entreprises sont ainsi le débouché privilégié pour les véhicules individuels à hydrogène. En revanche, la mobilité lourde (transport de marchandise et transports collectifs) est une piste intéressante. A condition bien sûr de produire de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, et en premier lieu pour l'industrie.

C'est le choix stratégique fait par de nombreuses collectivités locales en France. Gwénolé Le Bars, chargé de mission à l'association Amorce, qui conseille et accompagne les élus locaux sur les questions liées à la transition énergétique, indique ainsi que 59 projets ont été présentés lors du premier appel à projet national lancé par Amorce en 2019. 40 ont été retenus, le plus souvent pour le développement de flottes de transport public ou d'unités de production d'électricité renouvelable. Avec la promesse d'un développement économique local à la clé.

En janvier 2021, la plus importante usine de piles à combustible d'Europe devrait ainsi sortir de terre près de Lyon. L'entreprise rhonaine Symbio, passée de 50 salariés en 2018 à près de 300 en 2020, déménage de Grenoble à Saint-Fons. Symbio envisage 1000 emplois locaux à l'horizon 2025, dans la production et la recherche et



« Il ne faut pas s'intéresser qu'à ce qui se passe en sortie de pot d'échappement. Sinon, vous avez juste des embouteillages verts, pas une transition énergétique ! »

Bruno Faivre d'Arcier

développement, mais aussi des liens avec le monde universitaire pour la création de programmes de recherche appliquée et de formation en lien avec leur activité. Faute de financements, la recherche académique sur la pile à combustible était en effet presque à l'arrêt depuis quelques années, indique une source académique lyonnaise. De son côté, la société Himpulsion prévoit d'ouvrir trois centres de production d'hydrogène, à Lyon, Saint-Étienne et Grenoble, pour fournir les 20 stations de la *Zero Emission Valley*. Des perspectives économiques non négligeables en ces temps de chômage et de disparition annoncée de l'industrie automobile, qui expliquent en grande partie l'enthousiasme politique actuel autour de l'hydrogène, malgré la circonspection à laquelle appellent des associations comme NegaWatt.

Pas de transition sans changement de modèle

La lacune principale de l'enthousiasme actuel autour de l'hydrogène, rappellent en chœur Bruno Faivre d'Arcier, Marc Jedliczka et Gwénoél Le Bars, c'est qu'il éclipse la question des usages et des modèles de consommation énergétique. « *Aucune production d'énergie, aussi vertueuse soit-elle, ne dispensera de faire des efforts de sobriété. Ni de remettre les modèles de consommation en question* », réaffirme avec force Marc Jedliczka. Bruno Faivre d'Arcier abonde avec humour : « *Il ne faut pas s'intéresser qu'à ce qui se passe en sortie de pot d'échappement. Sinon, vous avez juste des embouteillages verts, pas une transition énergétique !* »

Voiture partagée ou à la demande, réseaux de transports publics renforcés, mutualisation de la production d'énergie renouvelable, et surtout verdissement de l'industrie : les pistes existent, mais nécessitent une réflexion à la fois globale et fine, sur les usages et les énergies les plus à même d'y répondre. « *Cette réflexion arrive toujours après la mise en place de la politique industrielle, c'est dommage* », tacle Bruno Faivre d'Arcier. La question de l'énergie touche en effet à celle des modes de vie, des mobilités, des représentations sociales autour de la réussite et du loisir. « *Quand on commence à parler énergie, on finit par parler de modèle de société* », résume Marc Jedliczka. Pas de transition énergétique sans révolution des esprits.



"Bonbonnes d'hydrogène sous haute pression (700 bar) stockées au laboratoire Ircelyon, à Villeurbanne. Le stockage et l'usage d'hydrogène dans les laboratoires de recherche obéit à des normes strictes, compte tenu du risque d'accidents (incendies ou explosion)."

Bibliographie

Association NegaWatt, "Développer l'hydrogène : pourquoi et comment ?", 2020.
ADEME, "Guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations service de distribution d'hydrogène", 2015
Association Amorce, "Les usages de l'hydrogène dans les territoires", 2020.

POUR ALLER + LOIN :
popsciences.universite-lyon.fr/le_mag




À ÉCOUTER

Interview vidéo de
Bruno Faivre d'Arcier



22
NUMÉRIQUE

LE NUMÉRIQUE MENACE-T-IL LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?


Cette tribune est
publiée en partenariat
avec le média A.O.C

AOC
[Analyse Opinion Critique]

Par Hervé Rivano, Professeur des Universités à l'INSA Lyon, École Urbaine de Lyon,
Nicolas Stouls et Jean-François Trégouët, Maîtres de Conférences à l'INSA Lyon

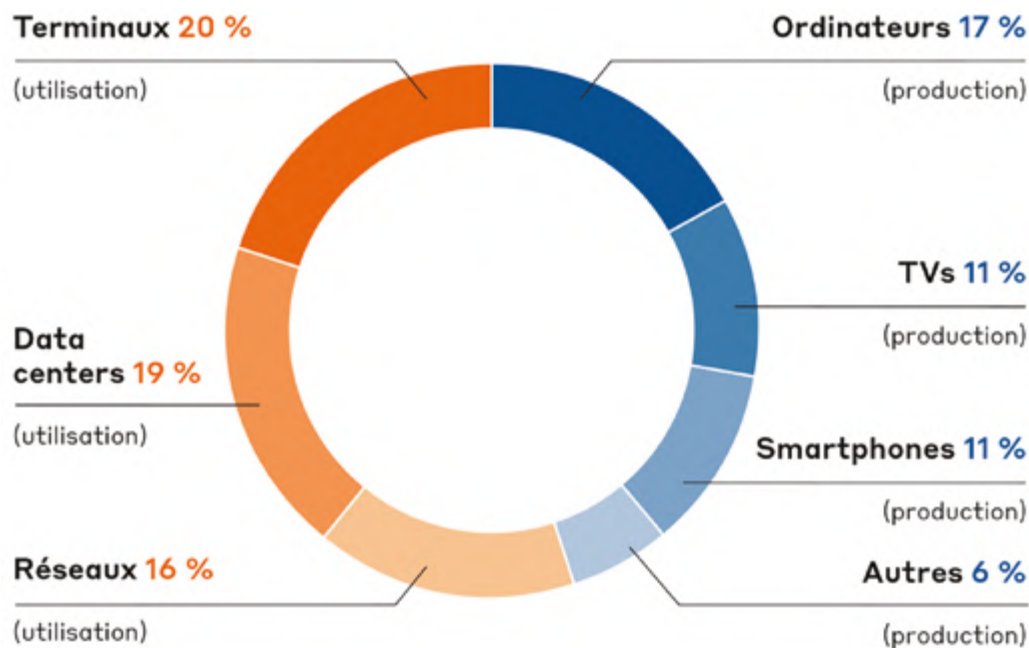
La mise aux enchères des fréquences pour le déploiement de la 5G, à rebours des recommandations de la convention citoyenne sur le climat, a relancé un débat public sur l'impact énergétique des infrastructures numériques. Si ces infrastructures permettent d'optimiser notre consommation d'énergie, leur prolifération peut également produire l'effet inverse à celui escompté et finalement menacer la transition vers un modèle énergétique et sociétal « bas carbone ». De quelle manière peut-on conjuguer sobriété et numérique ?

L'impact environnemental d'un terminal électronique comme l'ordinateur ou le smartphone ne se limite pas à sa consommation électrique en fonctionnement. Une notion plus complète est "l'analyse en cycle de vie" qui inclue également la fabrication, le recyclage, le traitement des déchets... Ainsi, l'électricité consommée par un smartphone durant sa "vie" ne représente que 15%

de son coût énergétique total.¹ Un des impacts environnementaux majeurs liés à la fabrication des smartphones modernes est par exemple l'utilisation de "terres rares" difficilement recyclables et dont l'extraction minière très polluante pose de graves problèmes géopolitiques et humanitaires, notamment autour du travail des enfants et des prisonniers.² 

1> F. Bordage, "Le numérique menace-t-il la transition énergétique ?" greenit.fr, 2016.

2> G. Pitron, "La guerre des métaux rares". Les liens qui libèrent, 2018



Distribution de la consommation d'énergie finale du numérique par poste pour la production (45 %) et l'utilisation (55 %) en 2017

Source : Lean ICT, The Shift Project 2018

› L'empreinte écologique du cycle de vie du numérique

3 > C. Diguët, F. Lopez, L. Lefevre; "Impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires", 2019, ADEME

Pour être complète, cette analyse de cycle de vie doit non-seulement prendre en compte le terminal lui-même, mais aussi l'infrastructure sans laquelle les services offerts aux usagers ne pourraient exister. Principalement cellulaire ou wifi, le réseau transporte un flux de données en forte croissance, allant jusqu'à saturer la 4G dans les endroits densément peuplés. Un stade de foot récent, comme celui de Lyon, nécessite ainsi plusieurs dizaines d'antennes 4G et plusieurs centaines de bornes wifi pour fournir une connexion correcte aux spectateurs. Pour ne prendre que l'exemple de la vidéo, l'émergence de la 4K et des réseaux sociaux fondés sur la photo et la vidéo induisent un impact environnemental croissant des réseaux que l'on ne peut dissocier des smartphones. Ces services sont par ailleurs exécutés sur des datacenters considérés comme très

énergivores³ et dont le gigantisme interroge : NegaWatt estime qu'en 2015 les datacenters français consommaient 2% de l'électricité de la France, soit 10TWh/an et le think tank « The Shift Project » projette qu'en 2025 ce ratio sera de 5% à l'échelle mondiale. Bien que les datacenters permettent de mutualiser certains coûts et d'optimiser les performances énergétiques, ils masquent, en partie, l'impact réel du numérique sur l'environnement, puisqu'ils prennent en charge une part fondamentale des calculs qui devraient sinon se faire sur les smartphones et ordinateurs.

« La diminution de l'empreinte écologique d'un produit par son optimisation énergétique est susceptible d'être effacée par une augmentation de son usage »

Cette analyse de cycle de vie permet d'étudier plus finement l'intérêt et l'impact d'une nouvelle technologie numérique. Imaginons par exemple qu'une ville envisage l'acquisition d'une solution d'éclairage intelligent. Adapter le niveau d'éclairage à la présence réelle de personnes dans la rue permet des gains énergétiques importants si la rue est peu passante, ainsi qu'une diminution de la pollution lumineuse. Par contre, les capteurs, le réseau et le contrôle à déployer ont un coût de production, de fonctionnement et de fin de vie. S'il faut en plus changer les lampadaires pour qu'ils soient compatibles, il semble peu probable que les gains en termes de consommation électrique d'éclairage soient suffisants pour compenser les coûts de production. Par contre, si ce déploiement se fait lors d'une opération nécessaire de renouvellement des lampadaires, il peut devenir envisageable d'avoir un bilan environnemental positif. Toute initiative visant à renouveler un parc technologique devrait donc être soumise à une analyse systémique explicitant et chiffrant clairement les objectifs attendus.

Le paradoxe de l'effet rebond

L'impact du déploiement d'une technologie numérique (ex : les capteurs de présence) doit non seulement être évalué au regard de l'application qui en est faite (ex : l'éclairage urbain), mais également des modifications d'usage qu'il induit. Autrement dit, la diminution de l'empreinte écologique d'un produit par son optimisation énergétique est susceptible d'être effacée par une

augmentation de son usage. Cet effet dit « rebond », souvent complexe à prendre en compte, a été médiatisé dans le débat sur la 5G. En effet, l'amélioration constante des infrastructures réseaux a permis une réduction d'énergie vertigineuse à usage constant : la consommation électrique des communications mobiles finlandaise a été divisée par 40 entre 2010 et 2017,⁴ et, selon l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep) le passage de l'ADSL vers la fibre divise par 3 la consommation des communications fixes. Pourtant les usages ne sont pas constants et la consommation globale croit elle aussi. Par exemple, la démocratisation de la 3G puis de la 4G, a permis le développement de la production de vidéos sur mobiles et l'émergence de nouveaux services gourmands en bande passante tels que *Periscope*, *Facebook Live*, *Instagram*, ou plus récemment *TikTok*.

Sans juger du bien-fondé ou non de ces services, il faut simplement constater qu'ils auront contribué à "consommer" les gains en efficacité. C'est encore cet effet rebond qui est à l'œuvre lorsque le « smart parking », a priori vertueux puisque limitant les émissions des automobilistes en les orientant vers des places de stationnement libres, freine en fait la transition vers des mobilités moins polluantes en facilitant l'usage du véhicule individuel. Dans les *datacenters* les gains en énergie sont également impressionnants, mais permettent aussi le développement des intelligences artificielles ou des cryptomonnaies, extrêmement énergivores.⁵ ①

« La facilité d'usage offerte par Netflix induit un avantage différentiel provoquant une augmentation de la consommation. »

4 > H. Pihkola, M. Hongisto, O. Apilo, M. Lasanen, "Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer". Sustainability, 2018

5 > IEA report, "Data Centres and Data Transmission Networks". IEA, 2020

6 > IEA report, "The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines". IEA, 2020

› Finalement, l'évolution des usages qu'induit une innovation technique doit aussi s'appréhender avec l'évolution de la société. Le Shift Project estime que regarder un film HD sur *Netflix* a un impact carbone plus grand que d'aller chercher un DVD en voiture à 10 km.⁶ Cette comparaison ne fait pas l'unanimité, mais même sous l'hypothèse d'un impact équivalent, la facilité d'usage offerte par *Netflix* induit un avantage différentiel provoquant une augmentation de la consommation. Surtout pendant un confinement, période durant laquelle *Netflix* ou *Youtube* on consentit à diminuer la définition de leurs flux pour « laisser la place » au télétravail, sans pour autant que la consommation de contenus ait diminué. Cette modification des comportements n'est pas le fruit du hasard, mais d'une stratégie. De fait, le PDG de *Netflix*, Reed Hastings, déclare qu'il est « *en compétition avec le sommeil* ». Cela suggère un autre niveau d'analyse. Au-delà d'une nouvelle manifestation de l'effet rebond, cet exemple permet de mesurer le rôle singulier que joue le numérique dans l'extension de la sphère de la consommation.

La ligne de front actuelle est donc le sommeil, perçue comme une anomalie capitaliste, puisque non exploitable. Les débats sur le droit à la déconnexion laissent penser, d'ailleurs, que la frontière du domaine de la production, du travail, n'est sans doute pas beaucoup plus éloignée. On mesure ici l'ampleur des conséquences sociales, voire anthropologiques, du numérique, qu'il serait périlleux de négliger. Pour penser l'articulation du numérique dans la transition énergétique, il faut donc user de cette triple focale impliquant l'analyse directe, considérant chaque étape du cycle de vie du terminal et du réseau qui le supporte, l'analyse indirecte, s'attachant à replacer cet appareil dans son contexte applicatif, et finalement l'analyse structurelle, visant à comprendre comment cette application s'insère dans la sphère économique et sociale.

« Que sacrifie-t-on réellement pour quelques dixièmes de seconde de temps d'attente entre l'émission de notre requête internet et la réception de sa réponse ? »

Identifier les besoins dont la satisfaction semble déraisonnable

Cette méthodologie permet de rendre compte de l'impact réel d'une technologie. Il devient alors possible de mettre en balance cette dernière avec le besoin auquel elle se propose de répondre. Cette analyse croisée de l'impact et des besoins est l'ingrédient nécessaire à l'établissement d'une démocratie technique informée. Au-delà de la distinction entre besoins authentiques et artificiels du sociologue Razmig Keucheyan, il s'agit d'identifier collectivement les besoins dont la satisfaction semble déraisonnable, même parmi ceux jugés authentiques. Un tel débat pourrait notamment porter sur la pertinence de maintenir une disponibilité optimale et permanente des infrastructures de télécommunication, qui implique un surdimensionnement des équipements pour garantir une qualité de service constante, même aux « heures de pointe » et au cœur de la nuit. Combien coûte cette exigence ? Que sacrifie-t-on réellement pour quelques dixièmes de seconde de temps d'attente entre l'émission de notre requête internet et la réception de sa réponse ? Tous les services doivent-ils vraiment être disponibles 24h/24 ?

Il existe très peu d'exemples où un débat public de cette nature a abouti soit au refus effectif d'une technologie, soit à sa mise en œuvre. Au contraire, il semble que la discussion publique n'ait pas de prise sur la « vie » des techniques. En cause ici, une survalorisation de l'efficacité des préconisations à destination des

« consommateurs », trahissant une conception du marché comme agrégateur universel d'options individuelles et conduisant à une décision globalement optimale. Se cantonner aux actions individuelles n'est pas une vision opérante pour la transition énergétique : d'après le cabinet de conseil Carbone 4, là où une trajectoire compatible avec les accords de Paris exige une réduction d'environ 80% de l'empreinte carbone moyenne des Français, cette dernière ne diminuerait que de 25% dans l'hypothèse maximaliste où l'ensemble de la population userait, tous les jours de l'année, de tous les leviers activables à l'échelle individuelle : régime intégralement végétarien avec approvisionnement local, suppression complète des trajets en avion, achat électroménager et *high-tech* exclusivement d'occasion... Le scénario plus réaliste situe quant à lui cette baisse entre 5 et 10%. Dans le domaine numérique, il n'est pas permis d'espérer plus d'une action exclusivement individuelle, même généralisée. On comprendra que les autres acteurs que sont l'État et les entreprises ne peuvent se dédouaner à peu de frais sur la responsabilité individuelle des citoyens.

Contraindre le numérique à opérer sa transition ?

Pour dépasser les limites de l'incitation individuelle, il reste à envisager les mesures contraignantes et incitatives fortes, s'imposant à tous. Deux leviers majeurs sont à disposition : la loi et la fiscalité. Si un certain air du temps considère le cadre légal comme archaïque, rappelons d'abord que ce n'est pas la « consommation responsable » qui a mis fin au travail des enfants. Rappelons ensuite, que si l'évolution de la loi peut être considérée comme « liberticide » par certains dans un premier temps, il n'est pas rare qu'elle soit finalement largement acceptée par la suite, comme ce fut le cas des multiples mesures pour la sécurité routière ou pour le commerce

des armes. Dans le domaine numérique, certains pensent à imposer l'extension universelle de garantie d'achat sur les produits *high-tech* ou à limiter les connexions Internet (en débit ou en volume). Certains objectent un effet anecdotique ou une défausse sur les utilisateurs, d'autres estiment que c'est le moyen d'atteindre d'emblée la bonne échelle qui diminuera l'obsolescence programmée et retardera la croissance des infrastructures. Une fiscalité adaptée aux enjeux numériques pourrait aussi offrir un cadre économique favorable aux entreprises « vertueuses », qui s'engagent dans la réutilisation ou la réparabilité des équipements numériques par exemple, et les sortir des marchés de niches où elles sont souvent cantonnées. Au-delà de ces exemples, il s'agit de se doter des moyens de mettre en œuvre une stratégie collective pour que les développements numériques soient réellement au service de la transition écologique planétaire et non pas un déport géographique des émissions ou des accélérateurs du changement climatique.

Dans un contexte de crise écologique annonciatrice de contraintes naturelles inédites, nécessitant des réponses au moins partiellement techniques, il semble urgent de se doter d'un processus de démocratie technique informée se donnant les moyens de faire appliquer ses décisions, tout spécialement sur la question du numérique.

POUR ALLER + LOIN :
popsociences.universite-lyon.fr

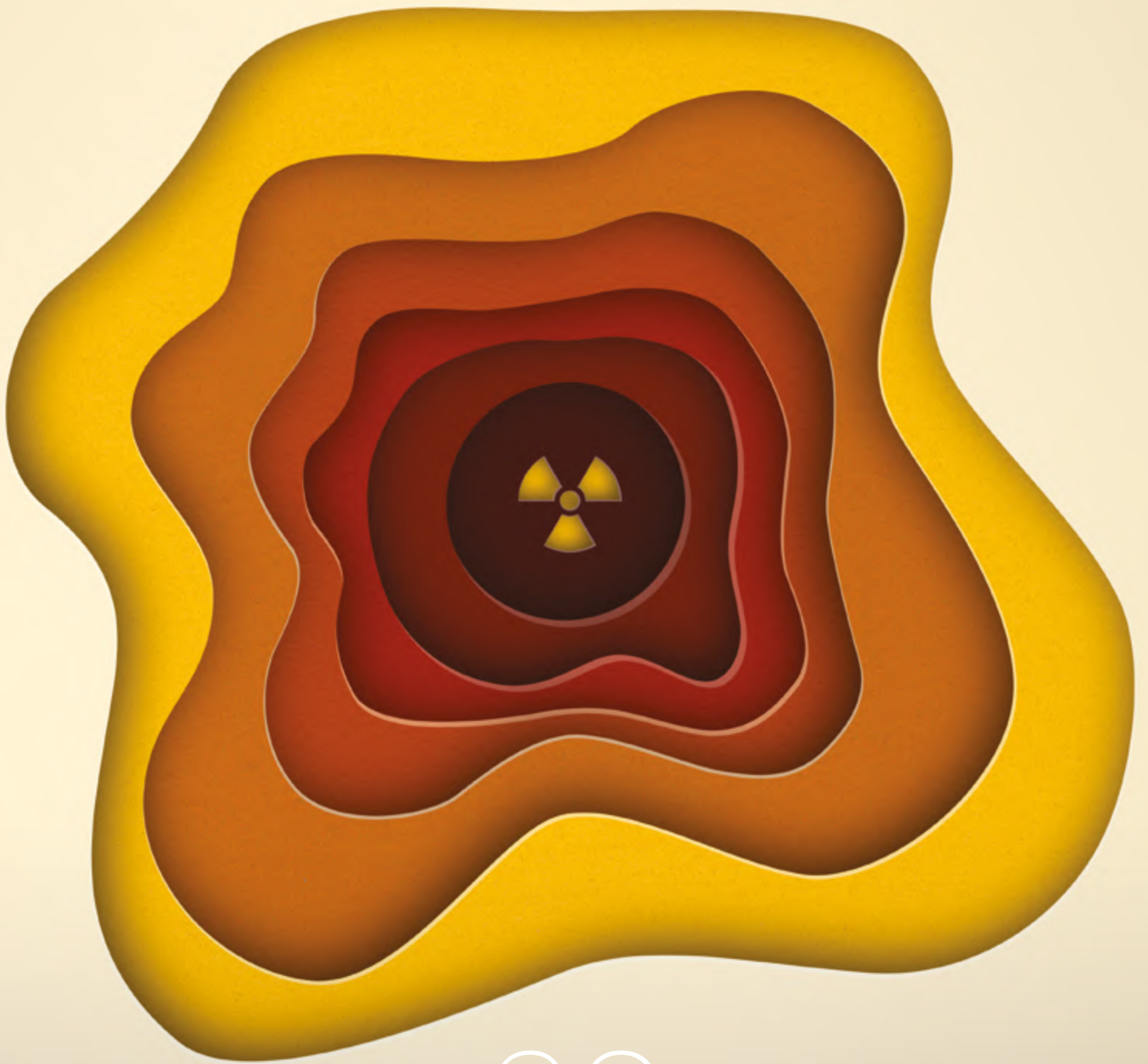


À LIRE

Foire aux questions scientifique : "Télétravail, 5G, Netflix ... Notre empreinte numérique est-elle soutenable ?"

Bibliographie

Bordage F. "Le numérique menace-t-il la transition énergétique ?". greenit.fr, 2016.
Pitron G. "La guerre des métaux rares". Les liens qui libèrent, 2018
Diguet & al. "Impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires", 2019, ADEME



28
DÉCHETS
NUCLÉAIRES

NUCLÉAIRE : LES DÉCHETS EN HÉRITAGE

Par Samuel Belaud

Que la filière énergétique nucléaire s'arrête immédiatement ou non, nous devons composer avec un « stock » de déchets radioactifs non-réutilisables dont il faut assumer et organiser le traitement, ainsi que la sécurisation, sur plusieurs milliers d'années. La recherche scientifique s'attache dès lors à résoudre une problématique de taille : comment faire en sorte que l'héritage nucléaire que nous allons léguer aux générations futures n'impacte pas leur environnement, leur quotidien, ni leur santé ?



ôté face, la France affiche une production électrique efficace (autosuffisante) et décarbonée à près de 92%, grâce en

particulier à un importants parc de réacteurs nucléaires non-émetteurs de gaz à effet de serre (70% de la production électrique du pays)¹. Côté pile, le traitement d'une partie des déchets nucléaires, en particulier ceux présentant une forte radiotoxicité, est irrésolu. Aucune meilleure solution que celle de l'entreposage ou de l'enfouissement de la matière radioactive non-recyclée n'a été trouvée. Une partie des déchets affichent en effet des niveaux de radioactivité très élevés et une durée de vie qui peut se compter en centaines de milliers d'années. Un héritage, dont les conséquences sanitaires et environnementales sont incertaines, ainsi que potentiellement néfastes à long terme. De nombreux scientifiques s'attachent à éclairer nos choix pour l'avenir : en préparant les prochains démantèlements d'installations nucléaires, en concevant des solutions pour l'assainissement des sites nucléarisés ou en déterminant de nouveaux circuits d'information autour des déchets radioactifs,

entre les producteurs, les gestionnaires, les associations, les collectivités territoriales et les citoyens.

Nommer les déchets nucléaires c'est les connaître

Une substance radioactive est considérée comme un déchet nucléaire dès lors qu'il n'existe aucun moyen de la réutiliser ou de la recycler. Nathalie Moncoffre, Directrice de recherche à l'Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon - IP2I (CNRS / Université Claude Bernard Lyon 1), précise qu'avant tout, « *il convient de nous accorder sur l'origine des déchets radioactifs : près de 40% d'entre eux ne sont pas issus des centrales nucléaires.* » En effet, si une majeure partie de ces déchets proviennent du secteur électronucléaire (59,6%), l'inventaire national des matières et déchets radioactifs distingue (fin 2018) quatre autres secteurs économiques de production : la recherche (27,3%), la défense (9%) et dans une moindre mesure le médical et l'industrie non-nucléaire (env. 4%).

¹ > Bilan électrique 2019, RTE, février 2020.

2>. Le becquerel détermine l'unité de la radioactivité et est calculé en désintégration/seconde

3>. Espèce atomique radioactive, définie par son nombre de masse, son numéro atomique et son état énergétique nucléaire (Définition de l'Agence de Sûreté Nucléaire).

4>. Éclatement d'un noyau lourd, par exemple d'uranium ou de plutonium, en deux parties sous l'effet d'un bombardement de neutrons (Définition de l'Agence de Sûreté Nucléaire).

5>. Établissement public chargé de la gestion à long terme des déchets radioactifs produits en France



À REGARDER → P. 32

Photoreportage À Bure, un héritage radioactif à enfouir

› La distinction entre les déchets radioactifs s'opère ensuite selon deux critères. Leur degré de radioactivité (calculé en becquerel/g)² et leur période (durée de demi-vie), c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le nombre de noyaux d'un échantillon radioactif diminue de moitié. Nathalie Moncoffre, indique que « les volumes de ces déchets sont fonction inverse de leur niveau de radioactivité », c'est-à-dire que près de 95% de la radioactivité est contenu dans à peine 0,2% du volume de déchets nucléaires. Dès lors, ces déchets ne seront évidemment pas gérés de la même manière selon les radionucléides³ qui les composent et selon qu'ils proviennent du cœur du réacteur (résidus de combustible), des activités liées à la gestion d'une installation nucléaire (gants, filtres...), ou de la déconstruction d'une centrale (ferrailles, bétons...).

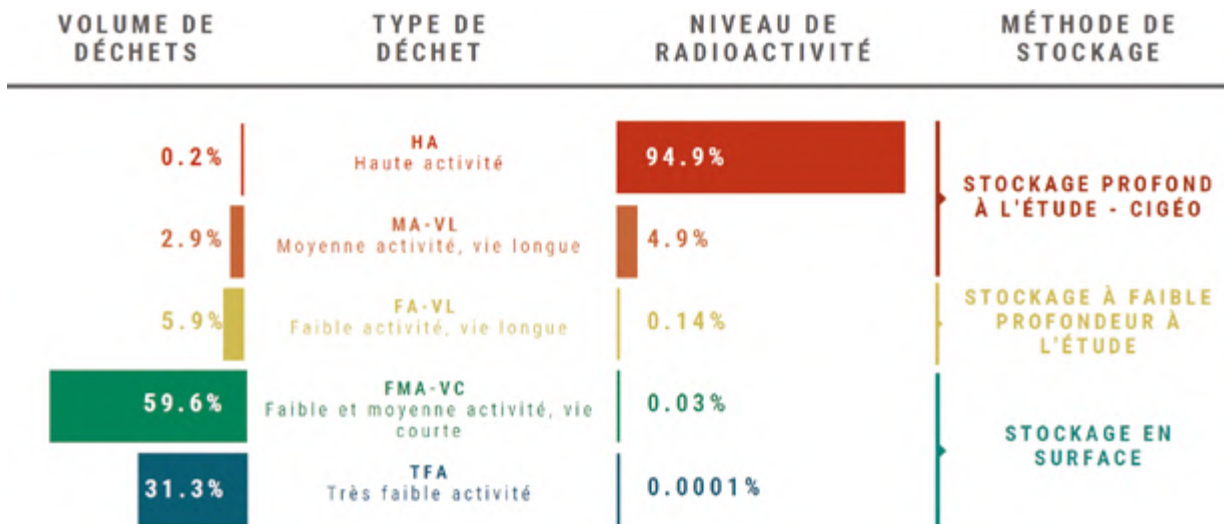
56 réacteurs nucléaires sont aujourd'hui en fonctionnement sur le territoire français. Tous sont dits réacteurs à eau pressurisée (REP) : « ils fonctionnent à neutrons "lents", précise Nathalie Moncoffre. Quand la fission⁴ se produit au cœur d'un REP, les neutrons doivent être ralentis et c'est l'eau qui permet de le faire. Elle a aussi une fonction de caloporteur, en transportant la chaleur produite par la fission sous forme de vapeur d'eau qui, sous pression, actionnera les turbines qui produira au final l'électricité. » Ces réacteurs ont un cycle de vie initial de 40 ans. La majorité d'entre eux ayant été mis en service entre 1980 et 1992, de nombreuses centrales auront atteint leur limite de fonctionnement et devront être démantelées d'ici 10 à 20 ans. Les volumes croissants de déchets à venir s'ajouteront aux plus de 1 640 000 m³ de déchets nucléaires qu'on comptait sur le sol français en 2018. Des déchets déjà stockés ou bien destinés à être pris en charge par l'Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra)⁵.

Déchets : une gestion qui ne fait pas consensus

L'industrie électronucléaire et les chercheurs font face à trois enjeux immédiats : confiner les substances les plus radioactives, développer des stratégies de confinement adaptées à chaque catégorie de déchets nucléaires et maîtriser la quantité produite de ces déchets.

La réponse à ces enjeux n'est pas communément admise, notamment parce qu'une partie de ces déchets ne fait l'objet – à ce jour – d'aucune stratégie de confinement. C'est le cas des plus radiotoxiques d'entre eux, dits à « haute activité » (HA) et de ceux dont la durée de vie s'étale sur plusieurs centaines de milliers d'années, dits à « moyenne activité et vie longue » (MA-VL). La solution la plus aboutie à ce jour pour les conditionner est celle d'un stockage en couche géologique profonde. Elle devrait se concrétiser d'ici 15 ans, à la frontière de la Haute-Marne et de la Meuse **au sein du centre industriel de stockage géologique (Cigéo) à proximité de Bure.** « L'objectif d'un tel site est d'éviter tout relâchement de radioactivité dans l'environnement et de prévenir le moindre risque de contact des déchets avec l'eau » souligne Nathalie Moncoffre. Et de préciser que Cigéo est « un laboratoire expérimental, qui doit s'assurer en particulier que la roche profonde du site réponde bien aux exigences de sécurité, sur le très long terme. »

La désignation d'une partie du territoire pour assumer géographiquement et industriellement la responsabilité des déchets nucléaires relève-t-elle plus de la contrainte que du consensus ? Insoluble question autour de laquelle se cristallisent les tensions entre gestionnaires et contestataires du centre d'enfouissement. Coincés entre l'irréversibilité d'un choix technologique opéré dans les années 60 et l'empreinte écologique que celui-ci laisse sur le long terme. Car si l'enfouissement des déchets radioactifs n'est pas une issue pleinement satisfaisante pour chacun, elle s'affiche pour le moment comme la « moins mauvaise » technologiquement. ➔ suite p.34



Source : Andra

LA TRANSMUTATION COMME PLANCHE DE SALUT ?

Une des pistes explorées pour résoudre la problématique de la durée de vie de certains éléments radioactifs tient en un mot : transmutation. Il s'agit – par le biais d'un laser de haute puissance ou d'un accélérateur de particules – de modifier la structure atomique de certains éléments radioactifs. Nous sommes loin du vieux rêve alchimiste de transformation du plomb en or, mais il s'agit bien de modifier le noyau d'un atome dont la durée de vie se compte millions d'années pour le transformer en un autre qui verra sa radioactivité réduite à néant en quelques décennies. Le projet européen MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) développe un prototype de réacteur nucléaire piloté par un accélérateur linéaire de particules qui permettrait de désintégrer les actinides mineurs du combustible (les éléments dont la demi-vie est la plus longue), promettant de réduire drastiquement la durée de radiotoxicité des déchets les plus radioactifs. Les chercheurs caressent l'espoir d'un « complément potentiel au stockage géologique pour la gestion sûre et à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de longue durée de vie » ainsi que le titre le document de position du centre belge d'étude de l'énergie nucléaire qui porte scientifiquement le projet.

Nathalie Moncoffre relativise l'avènement de cette solution. « Par rapport au volume de déchets à traiter, je pense que cette piste scientifique n'est pas à considérer avant très longtemps, d'autant plus qu'elle ne serait pas applicable aux déchets déjà conditionnés » prévient-elle. Notons également que la quantité d'énergie nécessaire à ce type d'opération est très importante – révélant par là un nouveau paradoxe : à quel point devons-nous consacrer de l'énergie à gérer les déchets que cette énergie produit ?

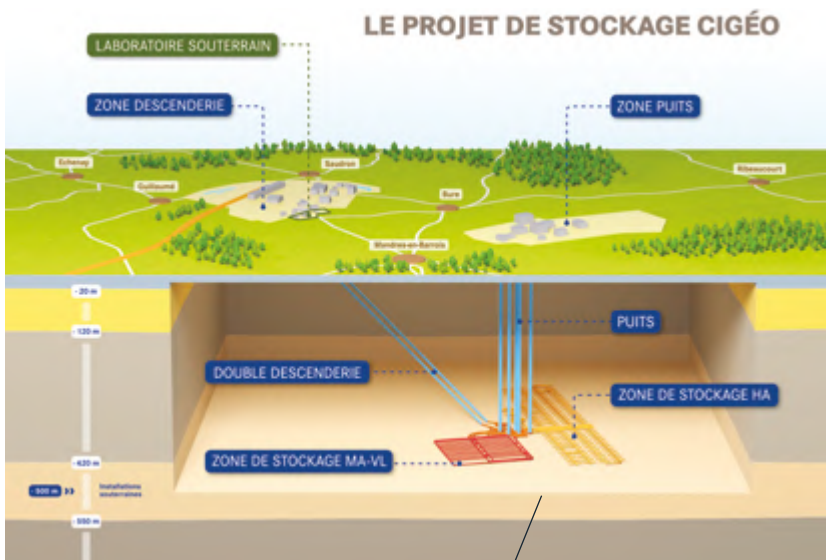
Gérard Mourou, a été récompensé en 2018 du prix Nobel de physique, pour ses travaux sur les lasers à très haute intensité, dont une des applications majeures pourrait être cette transmutation des déchets nucléaires. Dans son allocution après avoir reçu la prestigieuse récompense, le chercheur déclarait qu'« à l'avenir, l'énergie nucléaire est sans doute le meilleur candidat à la transmutation par laser à haute intensité ». La science finira-t-elle par développer des solutions qui « nettoieront » les déchets engendrés par les innovations qui ont précédé ? L'espoir est permis en s'accrochant à la définition qu'André Comte-Sponville fait de la science* « un ensemble ordonné de paradoxes testables, et d'erreurs rectifiées. »

* Dictionnaire philosophique, André Comte-Sponville, Presses Universitaires de France, 2001

À BURE, UN HÉRITAGE RADIOACTIF À ENFOUIR.

Après que la pratique de la submersion des déchets radioactifs dans les océans ait été stoppée dans les années 1990, la France a développé des solutions de confinement de ces déchets sur et sous terre. En 1998, le site de Bure dans la Meuse (98 habitants) a été désigné, non sans discordance, pour l'installation du centre industriel de stockage géologique – Cigéo.

Reportage à 500 m sous terre



Cigéo : une double emprise territoriale

- Au sol, les paysages de la frontière entre Haute-Marne et Meuse seront durablement redessinés avec l'implantation de deux sites industriels d'exploitation, un de 280 ha pour l'enfouissement (zone descendrière) et la recherche, l'autre de 270 ha pour les travaux et l'entretien des galeries souterraines (zone puits). Le territoire est autant transformé par cette emprise industrielle que par la construction de nouveaux équipements et aménagements routiers (station de carburants, réseau d'éclairage urbain, voirie rénovée...)
- En sous-sol, l'emprise est invisibilisée, mais bien plus conséquente qu'en surface : les galeries seront creusées dans une zone souterraine de 15 km² allant jusqu'à 500 m de profondeur, au cœur de la couche argileuse.

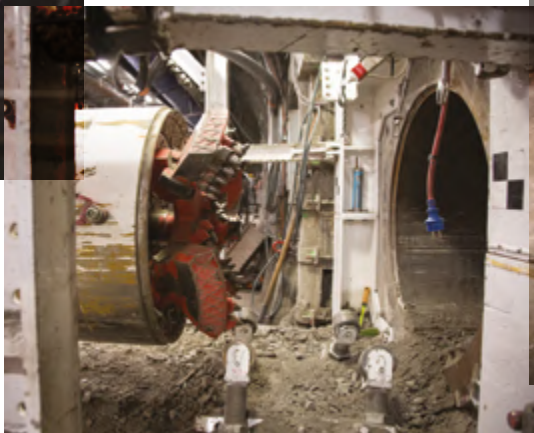


Un gigantesque laboratoire pour garantir la sûreté du futur site d'enfouissement
L'objectif de l'Andra : prévenir, réduire le risque et prévoir les modes d'intervention en cas d'incident. « *Le risque majeur lié aux déchets se situe dans le temps long. Nous devons prévenir au mieux la dégradation des colis de déchets afin d'éviter tout risque de fuite de radioactivité du site* » précise Mathieu Saint Louis, chargé de communication de l'Andra. C'est là que les sciences géologiques jouent pleinement leur rôle en étudiant précisément la structure et l'évolution de la couche rocheuse au cœur de laquelle les déchets seront entreposés. Les parois sont, en ce sens, criblées de capteurs et d'outils de mesures géologiques.



Un confinement inspiré des poupées russes

Avec Cigéo, l'Andra mise sur la multiplication de couches protectrices autour des matières radioactives pour sécuriser les « colis ». Les combustibles sont d'abord vitrifiés, puis mis en colis inox (à droite), avant d'être entreposés dans une alvéole (ci-dessous), elle-même incluse dans une couche ouvragée en béton armé, laquelle est entourée d'une dernière couche, la plus épaisse, celle formée par la roche argileuse située entre -350 et -490m sous le plancher des vaches buroises.



Un héritage à transmettre à des centaines de générations

« Cigéo sera vite rempli. Aujourd'hui, la moitié des emplacements de stockage prévus est déjà pourvue » prévient Mathieu Saint-Louis. En un siècle Cigéo aura rempli la première partie de son contrat : emmagasiner plus de 80 000 m³ de déchets. La seconde, le confinement sécurisé de la radioactivité, durera au moins 100 000 ans. Se pose dès lors la question de la « réversibilité » de l'enfouissement. Doit-on en 2150 sceller *ad vitam eternam* la crypte nucléaire ? Et dans ce cas, comment peut-on être certains que l'information sur son emplacement et sa structure se transmette efficacement pendant plusieurs siècles ? La question n'est pas encore tranchée et fait toujours l'objet de controverses industrielles, sociétales et scientifiques. L'Andra travaille plusieurs scénarios à la croisée de l'archéologie des paysages, de la linguistique, de la science des matériaux, pour créer des messages et des supports les plus durables possibles. Par exemple, l'utilisation du papier permanent (photo ci-contre).



Entre acceptabilité et résignation

Dans le centre-bourg de Bure, séparés par la rue de l'Eglise, la maison de la résistance et les locaux du Comité Local d'Information et de suivi du Laboratoire de Bure se font face. Symbole d'une réconciliation impossible ? D'ici 2035, date de mise en service prévue de Cigéo, l'Andra est entré dans une démarche de "conquête du consensus". Elle mène pour ce faire une campagne de concertations publiques qui, dans un effort de transparence, visent à une meilleure acceptabilité sociétale du projet. Il s'agit pour l'organisme de « sonder les attentes de la population riveraine à propos de la gestion de l'eau, de l'aménagement de l'espace, de l'énergie nécessaire aux installations ou encore de la desserte en transports du site ».

Cette démarche de dialogue arrive en réponse à une importante mobilisation citoyenne contre le projet. Passé par des contestations visibles (ZAD, manifestations, blocages...) le combat s'opère désormais plus discrètement sur des plans juridiques et politiques.

Ce faisant, l'ampleur de l'emprise territoriale de l'Andra est déjà telle (une écothèque, un observatoire de l'environnement, un laboratoire scientifique, un centre technique ... sont déjà sortis de terre), que la résignation semble prendre le pas sur l'opposition.



› Les TFA : angle mort des déchets nucléaires

Bien que la focale médiatique et politique s'attarde sur ces déchets très radioactifs, ils ne sont pas les seuls à prendre en considération. Emmanuel Martinais, géographe au laboratoire Environnement Ville Société et à l'ENTPE, travaille à « *comprendre les ressorts sociaux de l'information sur les déchets* »⁶. Il rappelle que le stockage de 97% du volume de déchets nucléaires s'opère à très faible profondeur ou en surface et qu'un tiers d'entre eux est classifié TFA : à très faible activité nucléaire. Malgré la « faiblesse » de leur désignation, cette catégorie de déchet n'est pas sans poser de questions de sécurité tout aussi cruciales que pour les déchets plus radioactifs (HA ou MA-VL - voir l'infographie page 31). Le projet Cigéo serait-il l'arbre qui cache la forêt ? « *En quelque sorte oui*, répond le chercheur, *on a aujourd'hui une filière des déchets TFA dont le site de stockage situé à Morvilliers dans l'Aube arrive à saturation. Et ce alors même que de nombreux démantèlements de générateurs de vapeur et de réacteurs nucléaires s'annoncent dans la décennie.* »

Le sujet est d'autant plus important que cet accroissement des stocks de déchets relance le débat houleux de la « libération » de ceux présentant la plus faible radioactivité. « *Il s'agirait de les réinjecter dans les filières traditionnelles de gestion des déchets, ou de les recycler pour refaire des routes, des bétons, des ferrailles...* ». Emmanuel Martinais regrette en outre que ces questions ne fassent pas partie du débat public. « *Les médias sont davantage focalisés sur Bure et cela peut se comprendre. Pourtant, les déchets TFA, bien qu'invisibilisés dans le discours, ne sont pas sans poser de questions, au sein même de la communauté sectorielle (producteurs exploitants, scientifiques, Andra)* ». Le Ministère de la transition écologique français a d'ailleurs ouvert la voie à une étude de faisabilité concernant la « libération » de déchets TFA métalliques, dans le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) à paraître fin 2020. Il déterminerait un seuil de libération, c'est-à-dire « *un niveau de radioactivité au-dessous duquel un déchet nucléaire peut être libéré, c'est-à-dire considéré comme non radioactif, et recyclable dans l'industrie conventionnelle* »⁷. Le chercheur relativise : « *la perspective d'une libération de ces déchets est encore loin de faire consensus* ».



« L'objectif d'un tel site est d'éviter tout relâchement de radioactivité dans l'environnement et de prévenir le moindre risque de contact des déchets avec l'eau »

Nathalie Moncoffre

Directrice de recherche à l'Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon

La balance bénéfico-risque du nucléaire affiche un équilibre incertain

La saturation des stockages et les démantèlements à venir ne sont pas les seuls dangers qui pèsent sur l'avenir de la filière des déchets nucléaires. Les entreposer et les confiner sera-t-il suffisant pour prévenir des menaces qui se déploient sur des milliers d'années ? Sécurité des sites de stockage, risque de corrosion au contact avec l'eau ou d'altération du verre (les colis de déchets radioactifs sont composés de matière radioactive vitrifiée)... Et outre ces menaces « quantifiables », un autre type d'aléa est désormais considéré dans les scénarios de gestion des déchets radioactifs : le dérèglement climatique et ses conséquences potentielles sur des structures géologiques dont nous escomptons une certaine stabilité sur le long terme.

Quoi qu'il advienne, ces choix devront s'opérer au regard d'au moins deux externalités positives de l'industrie nucléaire. D'abord, le fait que notre dépendance à l'énergie nucléaire soit salubre court-terme en ce qui concerne notre bilan carbone (70% du mix-énergétique et pas d'émission de gaz à effet de serre). Ensuite la puissance d'une filière économique historique : 64 départements français ont sur leur territoire une activité économique liée au nucléaire... et autant d'emplois à la clé.

La balance bénéfico-risque du nucléaire affiche un équilibre incertain, qui oppose deux types d'empreintes écologiques : faible en émissions carbone à court-terme vs. forte en radioactivité à

long terme. Là réside l'obstacle majeure à la prise de décision politique et à la mise en place de concertations dépassionnées. Pourtant, abandon ou non de l'industrie électronucléaire, la gestion des déchets relève d'une responsabilité économique, écologique et sociale majeure. Elle exige des efforts de transparence, d'inclusion, de sécurité et de réversibilité dont le dénominateur commun se retrouve dans les laboratoires de recherche, tant en sciences fondamentales que sociales.

6 > Projet METROPOLITIN : MÉTROlogie POLITique des déchets industriels en Europe : produire et utiliser de l'INformation sur les déchets

7 > Les travaux du PNGMDR sont librement consultables : pngmdr.debatpublic.fr

* L. Vende. Comportement des déchets graphite en situation de stockage: Relâchement et répartition des espèces organiques et inorganiques du carbone 14 et du tritium en milieu alcalin. Matériaux. Ecole des Mines de Nantes, 2012.

** A. Blondel, G. Silbermann, N. Moncoffre, N. Toulhoat, N. Béreud, et al.. Etude du comportement du chlore 36 et du carbone 14 dans le graphite nucléaire. IBAF 2010 - 3e Rencontre "Ion Beam Analysis Francophone", Nov 2010, Namur,

Bibliographie

Ogorzelec-Guinchard L. « Signalétique de l'apocalypse », Terrain, n°71, 2019

Garcier R., Verrax F. « Critiques mais non recyclées : expliquer les limites au recyclage des terres rares en Europe », Flux, n°108, 2017

Garcier R., « Disperser, confiner ou recycler ? Droit, modes de gestion et circulations spatiales des déchets faiblement radioactifs en France », L'Espace géographique, N°43, 2014

La Méthode scientifique « Déchets nucléaires : un débat radioactif », France Culture, décembre 2019

POUR ALLER + LOIN :

popsciences.universite-lyon.fr/le_mag



À ÉCOUTER

Interview vidéo de
Nathalie Moncoffre



DÉCHETS RADIOACTIFS : LE GRAPHITE DANS L'IMPASSE

On comptera 23 000 tonnes de déchets de graphite dès que les 9 réacteurs de la filière uranium naturel graphite gaz (UNGG) auront été démantelés. Quand l'industrie électronucléaire et l'Andra œuvrent à établir des scénarios de stockage sécurisé du graphite irradié catégorisé « faible activité – vie longue » (FA-VL), d'autres lui imagine des fonctions plus révolutionnaires.

Le graphite est composé d'atomes qui – une fois passés par une réaction nucléaire – affiche d'interminables périodes de radioactivité*. Le Carbone 14 par exemple, qui présente une période de 5 700 années, ou encore le Chlore 36, isotope pour lequel il faut patienter 301 000 ans avant que qu'il ne perde la moitié de sa radioactivité. Si les déchets de graphite affichent une « faible » activité, leur durée de vie est extrêmement longue et complique leur prise en charge par l'Andra.

Ils sont actuellement stockés en surface sur les sites des réacteurs et il n'y a, à ce jour, pas d'autre solution de stockage. L'enjeu est alors de simuler l'évolution du graphite dans le temps afin de proposer un site de stockage le plus sûr possible. « Nous avons cherché à reproduire en laboratoire la manière dont le graphite se modifie au cœur du réacteur et, à partir de là, nous pouvons simuler la diffusion des radioéléments dans les matériaux, ou encore déterminer comment cette matière radioactive se comportera sur le long terme » précise Nathalie Moncoffre à propos de plusieurs projets de recherche menés à l'IP21**

L'illusion d'une énergie sans fin

Le salut pour le graphite viendrait-il d'une start-up ? Neel Naicker, porte-parole de NDB a déclaré dans un article publié par *New Atlas* le 25 août dernier : « Imaginez un monde où vous n'auriez pas du tout à recharger votre batterie pour la journée. Imaginez maintenant que ce soit pour la semaine, pour le mois... Et pendant des décennies ? C'est ce que nous pouvons faire avec cette technologie ». La pierre angulaire de cette nouvelle technologie a priori révolutionnaire : le Carbone 14. NDB isole ces isotopes nucléaires à partir des déchets nucléaires qu'elle récupère des réacteurs UNGG. Cette déclaration vient à la suite des travaux d'une équipe de recherche de l'Université de Bristol qui avait réussi à développer ce type de « batterie diamant » en retirant le Carbone 14 du graphite irradié. La promesse est majeure : créer une pile éternelle qui fonctionne à partir de déchets radioactifs dont on ne sait justement pas comment gérer la longue période de radioactivité. Débarrassés de leurs isotopes les plus radioactifs, la gestion de ces déchets s'avèrerait bien plus aisée.

Certains s'étaient déjà essayés au mythe de l'énergie infinie et propre à partir de matière radioactive quand, en novembre 2013, l'entreprise *Laser Power System* promettait la sortie prochaine d'un moteur fonctionnant au thorium. Concept dont personne n'a entendu parler depuis ... Nous permettant de relativiser : si le progrès nécessite une bonne dose d'enthousiasme, le miracle énergétique ne pourra pas venir d'une seule innovation ... Aussi prometteuse soit-elle.



36


TRANSITION

À CATASTROPHE LENTE, TRANSITION LENTE ?

Par Ludovic Viévard

Le changement climatique, l'épuisement des ressources naturelles, la réduction de la biodiversité... autant de signaux d'alerte qui appellent à une transformation profonde de nos modes de vie. Alternatif au principe de « développement durable » qui a échoué à mobiliser et à porter un changement de société, celui de « transition » ou de « transformation profonde » (*deep transition*) s'impose aujourd'hui pour tenter de revivifier l'action et échapper au pire que craignent nombre d'entre nous. Que signifie l'apparition du terme transition et pourquoi, malgré l'urgence, le changement demeure si compliqué ?

En 1972 paraît un ouvrage qui fera date : *The Limits To Growth*. Ce rapport que le Club de Rome¹ avait commandé à des chercheurs du *Massachusetts institute of technology* (MIT) alertait sur les risques d'un développement reposant sur une croissance infinie dans un monde fini. En cela, il préparait l'émergence du concept de développement durable ou soutenable (*sustainable development*), institutionnalisé avec le rapport Brundtland (1987), et popularisé lors du Sommet de la Terre de Rio, en 1992, qui institua la mise en place des Agenda 21 et la stratégie du « *think global, act local* ». Mais 50 ans après

la première alerte, et alors que se multiplient les signes de crise environnementale et de ses conséquences économiques, politiques ou sociales, il faut se rendre à l'évidence : les modèles de société ne se sont que peu transformés. Kirsten Koop, enseignante-chercheuse à l'Institut d'urbanisme et de géographie alpine à l'Université Grenoble Alpes, constate ainsi que le concept de développement durable « *a perdu de sa force de transformation des sociétés pour devenir un élément de communication et c'est pourquoi le terme de transition s'est progressivement imposé : il vient souligner le besoin d'un changement de modèle social* ». 

1 > Créé en 1968, le Club de Rome est un groupe de réflexion (think tank) associant des personnalités des mondes scientifiques, industriels, politiques et économiques. Au cœur de leur travaux, l'interrogation sur la modernité industrielle et la durabilité de l'essor économique et démographique exceptionnels que connaissent les Trente Glorieuses.



À REGARDER

→ P. 40

Photoreportage sur le
Collectif pour une
transition citoyenne
dans la Loire

2 > L'anthropisation est un concept utilisé en géographie et en écologie pour désigner l'impact de l'Homme (*anthropos*) sur son milieu (le paysage, la biodiversité, etc.) et / ou de façon plus globale, sur l'écosystème planétaire, en particulier le climat.

3 > Kaplan D. Lisicki O. « Open : Vers de nouveaux modèles économiques & imaginaires de la transition écologique ! », withoutmodel.com, 2015.

» « Transition », le fragile marqueur d'une époque ?

L'un des repères historiques majeurs de cette évolution de vocabulaire est la fondation, en 2005, du mouvement des villes en transition par Rob Hopkins. Suivie par de nombreuses villes, l'initiative s'appuie sur **les dynamiques de collectifs locaux** qui s'efforcent d'élaborer des modèles de société alternatifs dans des domaines aussi divers que l'habitat, les mobilités, l'énergie, les monnaies, l'alimentation... On lit encore cette évolution dans la terminologie gouvernementale avec, par exemple, un Ministère de l'Écologie et du Développement durable renommé, en 2017, Ministère de la Transition écologique et solidaire !

Enfin, la constitution du champ de recherche interdisciplinaire et international des « *sustainability transitions studies* » (STS) témoigne de l'aboutissement d'une transformation épistémologique. Kirsten Koop précise que ce domaine d'études est « *né en Europe dans les années 1990, autour d'un groupe implanté aux Pays-Bas, le Dutch Research Institute for Transition (DRIFT). L'idée est que passer d'un système à un autre nécessite d'importants changements, c'est-à-dire une transition ou une transformation, et pas seulement un aménagement de l'existant* ». La géographe précise que, « *à l'origine, les STS ne portent pas une critique ouverte du capitalisme et de la croissance, mais prônent simplement un changement en profondeur du système. Toutefois, aujourd'hui, une partie des chercheurs remet en cause la question de la croissance* ».

On le voit, avec ce terme, c'est toute la conception de l'anthropisation du monde² et de ses conséquences qui se redéfinit à tel point qu'on peut le voir comme le marqueur

d'un renouvellement idéologique. Celui-ci demeure pourtant fragile, d'abord dans sa capacité à produire une action à une large échelle, ensuite à proposer un imaginaire fécond et stimulant, capable de dessiner les contours d'un futur désirable.

Le catastrophisme empêche-t-il la transition ?

L'idée que l'influence de l'Homme sur l'environnement est telle que l'avenir en sera nécessairement bouleversé est de plus en plus largement partagée. Mais la trajectoire de cette transformation est loin de faire consensus. Si le principe de transition repose sur un modèle de transformation maîtrisée où tout est à inventer, du système productif au modèle économique en passant par le renouvellement des ressources énergétiques, il peine à produire un imaginaire entraînant. Une faiblesse pour le prospectiviste Daniel Kaplan, car « *une partie de notre difficulté à engager une transition écologique réside dans notre difficulté à imaginer la forme qu'elle pourrait prendre et le monde auquel elle donnerait naissance* »³. De fait, très peu de récits désirables se constituent autour de la transition, à part, peut-être, celui que l'auteur de fiction Alain Damasio cultive dans les *Furtifs* (2019) où se dessinent des alternatives frugales portées par des communautés autosuffisantes et autogérées.

« L'idée est que passer d'un système à un autre nécessite d'importants changements, c'est-à-dire une transition ou une transformation, et pas seulement un aménagement de l'existant. »

Kirsten Koop

Géographe, enseignante à l'Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine de l'Université Grenoble-Alpes, dirige l'équipe « Villes et Territoires » du laboratoire CNRS PACTE (UMR 5194) et est membre du Labex « Innovations et Transitions en territoires de Montagne »



© CThierry Egger/ UMR 5600 EYS

« Aujourd'hui encore, de nombreuses personnes ne peuvent ou ne veulent pas entendre parler de transitions. »

Natacha Gondran

Enseignante-chercheuse à l'Institut Fayol de l'école des Mines de Saint-Étienne et fait partie de l'UMR 5600 Environnement ville société.

D'autres avènements possibles, comme l'effondrement, la catastrophe ou la rupture écologique sont, eux, ancrés dans des imaginaires très puissants. La fin des ressources, par exemple, est depuis longtemps représentée dans des œuvres de fiction telles que *Le troupeau aveugle* (1972), *Soleil vert* (1973) ou *Mad Max* (1979) pour ne citer que quelques-uns des textes qu'analyse Yannick Rumpala, chercheur en sciences politiques. Pour lui, « l'affirmation d'une issue unique transforme (...) la fin de notre monde en fin de toutes les possibilités, à la façon sectaire des apocalypses millénaristes »⁴. C'est toute la différence sur laquelle insiste la philosophe Catherine Larrère entre anticiper la catastrophe pour pouvoir l'éviter, comme le faisait le théoricien du catastrophisme éclairé Jean-Pierre Dupuis, et professer l'avènement inévitable du pire, comme le font certains courants de la collapsologie. Ces récits qui prophétisent l'effondrement épuisent l'ensemble des imaginaires de la transition et empêchent autant de penser que d'agir.

📌 suite p.42

4 > Kyrou A. Rumpala Y. « De la pluralité des fins du monde : les voies de la science-fiction », *Multitudes*, vol. 76, n° 3, 2019.



THE GREAT TRANSITION INITIATIVE

The Great Transition Initiative est un réseau international de réflexion et de promotion de la transition. Critique envers la démarche de développement durable qui n'engage qu'un mouvement de réformes et d'ajustements jugés insuffisants, il promeut un modèle de transformation profonde reposant sur des changements culturels et un nouveau paradigme de durabilité. En proposant et illustrant trois scénarios prospectifs du monde d'après, *The Great Transition Initiative* produit autant d'imaginaires forts. Le premier correspond au monde moderne réformé par le marché et les politiques publiques. Le second illustre une « barbarisation » du monde où le renforcement des inégalités menace l'ordre social jusqu'à l'effondrement. Le troisième propose une grande transition, vision harmonieuse d'un monde fondé sur la coopération citoyenne et le partage. Ainsi analyse Kirsten Koop, la grande transition « signifie une volonté de rupture avec le monde conventionnel tout en refusant la voie de l'effondrement, et apparaît comme une troisième voie ».



© 2020 Tellus Institute



© 2020 Tellus Institute



© 2020 Tellus Institute

Source : <https://greattransition.org>

TRANSFORMER LA SOCIÉTÉ PAR LE BAS

Développé en Grande-Bretagne par Rob Hopkins en 2005, le principe des villes et territoires en transition s'est rapidement étendu dans le monde. En France, il s'implante d'abord dans le Trièze, près de Grenoble, à partir de 2009. En 2011, c'est au tour de la Loire de rejoindre le mouvement avec la création de l'association Loire en transition. En 2014, Loire en transition et les Colibris se rapprochent pour installer dans la Loire le CTC42, déclinaison locale d'un collectif national dédié à la transition citoyenne.

Aujourd'hui, le CTC 42 fédère 70 organisations autour de l'idée que la trajectoire de développement actuel conduit la société dans une impasse (réchauffement climatique, perte de biodiversité, inégalité du partage des richesses, etc.) et qu'il est urgent de transformer en profondeur l'ensemble de notre organisation. L'initiative a pour particularité de reposer sur l'engagement des habitants des territoires qui usent d'innovation sociale pour expérimenter des pratiques alternatives dans des domaines aussi variés que la monnaie, l'énergie, les mobilités, l'alimentation, l'environnement...



“ Il faut s'échapper des logiques de marché pour faire de la place à tous ”

Thomas, Rues du développement durable

Recoudre le tissu social de la ville

Créé en 2009 au pied du Crêt de Roc, l'une des sept collines de Saint-Etienne, l'association Rues du développement durable expérimente une façon plus juste de fabriquer la ville, en s'appuyant sur les habitants et les porteurs de projet. Elle accompagne les projets urbains ayant une dimension de transition – et souvent exclus du marché immobilier – qui souhaitent s'implanter sur le quartier et réactive les rez-de-chaussée qui sont autant de lieux de vie et d'échange, comme Le réfectoire, la cantine participative du quartier, ou l'Accorderie, qui propose de l'échange de services.

“

Opérer la transition est difficile car les gens craignent de s'engager dans un système qu'ils ne connaissent pas

Anonyme, Alternatiba

“

Progressivement, le développement durable a été utilisé par les acteurs économiques comme un alibi de verdissement pour continuer à faire comme avant. D'où le besoin de pousser d'autres notions, comme la transition

Joël, CTC 42



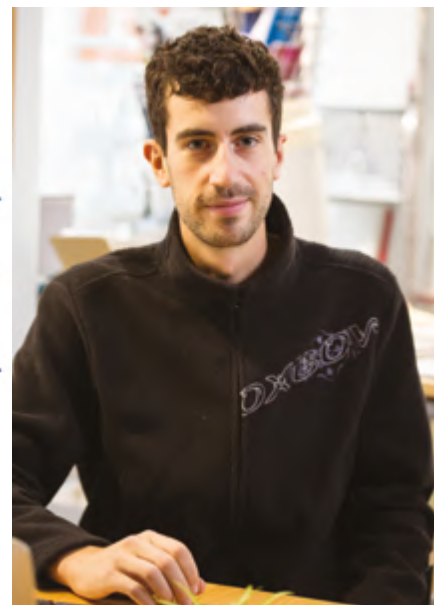
Actif sur les mobilités douces

Parce que les mobilités représentent un secteur fortement consommateur d'énergie fossiles et émetteur de CO₂, les déplacements sont un enjeu clé de la transition. Depuis 22 ans, Ocivélo travaille à donner plus de place au vélo en ville. Si cela passe par un effort de lobbying sur les élus et décideurs pour l'aménagement de pistes cyclables, il s'agit aussi d'accompagner les habitants dans la transformation de leurs habitudes. L'association organise ainsi des ballades, des formations à la bicyclette, des ateliers de réparation...

“

Le lien permet la réappropriation monétaire des citoyens et bénéficie au territoire

Quentin, Le Lien



Le lien, une monnaie locale résiliente

Créé à Saint-Etienne en 2012 et lancé en 2016, le lien est une monnaie non spéculative complémentaire à l'euro. Le principe est simple : les euros convertis en liens sont déposés à la Nef, une coopérative financière éthique, et investis pour développer des projets de territoires. Quant aux liens obtenus en retour, ils peuvent être échangés contre des produits chez les commerçants partenaires.

› Comment avancer dans la transition ?

Mais si la transition a du mal à advenir, c'est aussi parce qu'elle renvoie à des processus de transformation toujours complexes. Ainsi, explique Sabine Caillaud, directrice du département de Psychologie sociale et du travail à l'Université Lumière Lyon 2, « *la psychologie sociale montre que le changement ne peut s'envisager en dehors des résistances qu'il produit, qui tiennent à ce que chaque groupe social défend : son identité, son pouvoir, etc.* ». Une transition n'est pas un processus linéaire ou sans freins. Parmi ceux-ci, trois au moins sont identifiés, la temporalité et la spatialité, les normes culturelles et réglementaires ou encore l'acceptabilité sociale.

Se réconcilier avec le temps long. Le changement climatique se produit sur un temps long qui a du mal à s'articuler avec l'urgence à laquelle la société contemporaine est confrontée. À ce titre, on peut parler, comme le fait Michel Puech, d'une catastrophe lente⁵. Pourtant, explique Natacha Gondran, « *les conséquences du réchauffement climatique sont bien documentées depuis le milieu des années 1990. Mais tant que l'on n'était pas confronté à des tornades, des canicules, à la fonte des glaces ou du permafrost qui produit des explosions de méthane, etc., ça n'était pas considéré comme une priorité, parce que ça semblait lointain. Aujourd'hui, une prise de conscience émerge car, on en voit les effets dans nos vies. Mais on a perdu plus de 20 ans* ». Des difficultés liées à la temporalité mais aussi à la spatialité puisque les changements climatiques sont globaux et que les « *individus pris isolément n'ont qu'un degré de contrôle très faible, hypothétique, sur toutes les questions qui touchent à la protection [de l'environnement], le sentiment de maîtrise des individus de leur environnement s'arrêtant aux espaces privés, à leur foyer.* »⁶

5 > M. Puech ; « Les catastrophes lentes », *Le Portique*, 22 | 2009.

6 > Bonnefoy, B., Demarque, C., Le Conte, J., Feliot-Rippeault, M., « "Penser globalement, agir localement". Comment les distances spatiales et temporelles modulent notre relation à l'environnement », in Marchand, D., Depeau, S. et Weiss K. *L'homme au risque de l'environnement*, 2014, InPress, Paris

«En psychologie sociale, on s'est beaucoup intéressé aux variables qui influencent les changements individuels, moins aux mécanismes de changements collectifs...»

Sabine Caillaud

Directrice du département de Psychologie sociale et du travail à l'Université Lumière Lyon 2

Libérer les initiatives du poids des normes. Les normes réglementaires peuvent également constituer d'importants points de résistance. Kirsten Koop, qui étudie les innovations sociales appliquées à la transition, explique qu'il s'agit « *de laboratoires d'invention du futur localisés, mais qu'ils ne suffissent pas à passer à l'échelle supérieure. Les innovations, qui relèvent d'une rupture des normes et des pratiques, se heurtent aux lois et réglementations dont la fonction est précisément de faire perdurer le système conventionnel. Ces innovations arrivent donc rapidement aux frontières de la légalité. Comment inventer des façons de faire radicalement différentes, qui incarnent des valeurs alternatives, sans changer le système réglementaire ?* » Il ne suffit donc pas seulement d'encourager l'innovation sociale et permettre les expérimentations, il faut encore que les collectivités territoriales, les États, etc., fassent évoluer les cadres légaux pour rendre possibles les passages à grande échelle.

Faire que la transition ne soit plus « un problème de riche ». Un dernier point à souligner : un besoin d'acceptabilité qui dépend de la justice sociale. « *Il est important d'emmener tout le monde dans la transition, insiste Natacha Gondran. Aujourd'hui encore, de nombreuses personnes ne peuvent ou ne*

veulent pas entendre parler de transitions. Ce n'est pas entendable pour certains qui ont largement de quoi satisfaire à leurs besoins personnels, mais c'est tout à fait compréhensible pour d'autres personnes qui sont dans des situations sociales compliquées et qui ont des urgences telles qu'elles n'entendent pas toutes celle de la transition. » Il y a donc un enjeu à prendre en compte à la fois les perceptions individuelles qui s'expriment en termes de sentiments d'injustice et les mécanismes collectifs qui portent les principes de justice.

Les différences de compréhension autour de la transition pèsent donc sur sa mise en œuvre et c'est aussi le cas pour les écarts de normes culturelles, Sabine Caillaud illustre cet enjeu à partir de ses travaux : « en Allemagne, explique-t-elle, la question a une dimension morale, notamment en termes de solidarité entre générations ou entre pays. En France, elle a une dimension davantage économique et politique et met en jeu des tensions entre des modèles de société capitaliste et société décroissante ». Cela constitue évidemment une difficulté : comment des pays peuvent-ils s'accorder sur des mesures communes si leur compréhension du problème varie selon les contextes culturels de chacun ? D'ailleurs, conclut Sabine Caillaud, « en psychologie sociale, on s'est beaucoup intéressé aux variables qui influencent les changements individuels, moins aux mécanismes de changements collectifs... C'est une limite dont on a pris conscience il y a moins de 10 ans et tout un champ de recherches s'élabore autour des interactions entre les individus et les dynamiques sociales plus larges (entreprises, territoires, politiques publiques, etc.) ».

Faire la douloureuse expérience des effets de l'anthropisation du monde doit nous aider à accorder la temporalité de la catastrophe et celle de l'action. Les années perdues sont sans doute le prix d'une lente prise de conscience d'autant plus difficile à réaliser que c'est l'ensemble de notre mode de vie qui est à revoir. Mais si l'action est nécessaire, c'est aussi parce qu'elle permet de préserver la liberté de nos choix de société, avant que ne s'impose à nous une situation de rupture qui ne laisserait que peu de marge. C'est bien ce que signifie la notion de transition : l'urgence de l'action pour échapper à l'effondrement.

POUR ALLER + LOIN :
popsociences.universite-lyon.fr/le_mag



À ÉCOUTER

Interview vidéo de
Nathalie Ortar

Bibliographie

Hopkins R. Manuel de Transition : de la dépendance au pétrole à la résilience locale, éditions Écosociété, 2010

Boutaud A. Gondran N. Les limites planétaires, Paris, La Découverte, coll. « Repères Écologie », 2020

Larrère C. & R. Le Pire n'est pas certain : Essai sur l'aveuglement catastrophiste, éditions Premier Parallèle, 2020

OURS

DIRECTION DE LA PUBLICATION : **Stéphane Martinot**, Administrateur provisoire de la COMUE Université de Lyon

DIRECTION DE LA RÉDACTION : **Florence Belaën**, Directrice Culture, Sciences et Société - Université de Lyon

COMITÉ DE RÉDACTION

RÉDACTION EN CHEF : **Samuel Belaud**, Université de Lyon

RÉDACTEURS JOURNALISTES : **Ludovic Viévard, Grégory Fléchet, Cléo Schweyer, Hervé Rivano, Nicolas Stouls, Jean-François Trégouët, Samuel Belaud**

DIRECTION ARTISTIQUE : **Magdalena Nin, Antoine Ligier** (Agence Visée.A).

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES ET ILLUSTRATIONS : © **Visée.A**

SECRETARIAT DE RÉDACTION : **Patricia Lamy, Isabelle Bonardi, Cécile Rondeau, Céline Rosset, Florence Belaën, Agathe Lapeyre** (Université de Lyon)

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Bruno Allard (Laboratoire Ampère - Ecole Centrale de Lyon)

Marc Clause (Centre d'énergétique et de thermique de Lyon - INSA Lyon)

Céline Fallot-Buclet (Tenerrdis)

Bernard Fayolle (Association des Ingénieurs et Scientifiques de France)

Agnès Gahigi (Idex Lyon - Université de Lyon)

Natacha Gondran (Laboratoire Environnement, Ville, Société - Mines Saint-Etienne)

Nolven Guillaume (Institut de Recherche en Catalyse de Lyon - Université Claude Bernard Lyon 1)

Marc Jedliczka (Hespul - NégaWatt)

Thierry Manceau (Alté)

Nathalie Ortar (Laboratoire Aménagement Economie Transport - École nationale des travaux publics de l'État)

Olga Vizika - Kavvadias (IFP Energies nouvelles)

PARTENAIRES INSTITUTIONNELS

La Région 
Auvergne-Rhône-Alpes

GRANDLYON
la métropole

REMERCIEMENTS

à l'**Institut Fayol de l'école des Mines de Saint-Étienne**, au **Laboratoire Environnement Ville Société (EVS)**, à l'**Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon (IP2I)**, à l'**Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IrcelYon)**, au **Laboratoire Aménagement Economie Transport (LAET)**, à l'**Institut des nanotechnologies de Lyon (INL)**, à l'**Institut d'urbanisme et de géographie alpine** à l'Université Grenoble Alpes, à l'**Université Lumière Lyon 2**, à l'**École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE)**, à l'**Université Claude Bernard Lyon 1**, à l'**INSA Lyon**, à l'**ENS de Lyon**, au **SuperGrid Institute**, à l'**Hespul**, à l'association **NegaWatt**, à l'association **Amorce**, à l'**Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra)**, à la **Compagnie Nationale du Rhône**, au **Collectif pour une Transition Citoyenne dans la Loire (CTC42)**.

Merci à tous ces chercheurs, ingénieurs, citoyens, militants, entrepreneurs, d'avoir ouvert leur portes (et leur téléphone) à la rédaction de Pop'Sciences Mag, d'avoir répondu à nos questions et participé à la réussite de ce numéro.

CONTACTER LA RÉDACTION

RÉDACTION EN CHEF : samuel.belaud@universite-lyon.fr

PARTENARIATS ET DIFFUSION : cecile.rondeau@universite-lyon.fr

Si vous souhaitez recevoir un exemplaire gratuit du magazine, merci de bien vouloir en faire la demande par email à l'adresse popsciences@universite-lyon.fr

ISSN : 2680-5987 – Parution : novembre 2020 – Dépôt légal : septembre 2019
Pop'Sciences est une marque déposée.



POP'
SCIENCES
Université de Lyon

RETROUVEZ TOUTE L'ACTUALITÉ SCIENTIFIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LYON SUR LE PORTAIL NUMÉRIQUE POP'SCIENCES !

popsciences.universite-lyon.fr

P comme **Partager les savoirs**
O comme **Ouvrir les campus**
P comme **Produire de la connaissance avec et pour les citoyens...**

Tel est le leitmotiv de Pop'Sciences qui a tout simplement pour objectif de répondre à tous ceux qui ont soif de savoirs, de rencontres, d'expériences, de sons et d'images en lien avec les sciences et les techniques.

Ce portail, conçu et animé par l'Université de Lyon, l'ensemble de ses membres et ses partenaires privilégiés, a quatre fonctions : **un agenda** des activités de culture scientifique et technique dans le territoire de la Métropole de Lyon et du Rhône, **une banque de ressources multimédia** pour tous les thèmes questionnant les sciences et les techniques, **un catalogue des offres et des ressources pédagogiques** pour les scolaires proposés sur notre territoire et **une visibilité sur les collections patrimoniales des universités.**

Au travers du site internet, des productions médiatiques et de nombreux événements tout au long de l'année, Pop'Sciences invite à repenser la place des savoirs produits par nos chercheurs dans une société où le numérique a non seulement accéléré la circulation des savoirs, mais également a pu jeter le trouble entre des savoirs travaillés et des croyances, de l'expertise et des rumeurs.

