

IL FAUT AGIR !

L'Académie des technologies est un établissement public placé sous la protection du Président de la République.

Ses réflexions sont collectives et visent à l'utilisation des technologies pour un **progrès raisonné, choisi et partagé**.

Elle participe bien volontiers à la Concertation nationale sur le mix énergétique.

Elle rappelle cependant que la maison brûle :

- Les COP 26 et 27 n'ont pas obtenu des pays adhérents de sensiblement réduire leurs objectifs d'émissions pour atteindre l'objectif de réduction du réchauffement à 1,5°C, ou même à 2°C
- Le programme Fit-to-55 de la Commission européenne va relever fortement l'objectif français de réduction de ses émissions d'ici 2030
- **Le budget Carbone à dépenser d'ici 2050 est limité ; plus on tarde, plus l'effort sera lourd**

<https://www.academie-technologies.fr/>

SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE OU TECHNOLOGIES NOUVELLES ?

Une opposition simpliste

La plupart des consommateurs d'énergie et tout particulièrement les 11,9 % de la population (3,5 millions de ménages) en situation de précarité énergétique sont sobres, car l'énergie est de plus en plus chère. Si l'appel à la sobriété est donc nécessaire, l'impact des modifications de comportements individuels ne peut être que limité, d'autant que les dépenses d'énergie des ménages sont très liées à l'infrastructure dont ils disposent et qu'ils ne maîtrisent généralement pas (qualité et localisation des logements, accès aux transports collectifs, possibilité de mobilités douces, etc.). Quant aux industriels, il y a longtemps qu'ils fournissent des efforts considérables pour réduire leurs consommations notamment en récupérant l'énergie de leurs process.

L'objectif de sobriété de la SNBC 2 (- 40% par rapport à 1990) est extrêmement ambitieux. Il nécessite d'importants investissements dans de nouvelles infrastructures de production, transport, distribution et utilisation d'énergie et fait généralement appel à de nouvelles technologies. Celles-ci permettent une baisse de la consommation d'énergie. Il existe une interdépendance entre offre et demande, efficacité et sobriété : des comportements sobres comme le recours au covoiturage ou l'effacement de la consommation électrique aux heures de pointe, dépendent d'une infrastructure technologique et d'innovations.

A noter enfin que le moindre coût pour réduire les émissions de CO₂ n'est pas nécessairement la consommation minimale : il peut être plus efficace d'améliorer raisonnablement l'isolation d'un logement et de l'équiper d'une pompe à chaleur d'excellent rendement plutôt que de ne viser que l'isolation la plus élevée.

Et la « décroissance » ?

La « décroissance » prônée par certaines associations, économistes et philosophes, c'est la limitation, plus ou moins forcée, des consommations et des investissements pour réduire la demande d'énergie bien au-delà de - 40%.

Notre Académie se doit cependant d'attirer l'attention sur les conséquences de ce choix politique.

La sortie des énergies fossiles nécessitera des investissements considérables pour reconstruire le système énergétique (plusieurs points de PIB par an pendant une trentaine d'années), même si la consommation d'énergie décroît globalement. Le partage de la ressource entre consommation et investissements devra donc se déplacer au profit de ces derniers : si décroissance, les consommateurs subiront une double peine : moindre richesse nationale, moindre part de la consommation dans la richesse.

A moyen terme si la France n'utilise pas son plein potentiel de production, elle sera nécessairement déclassée. Renonçant à la réindustrialisation, sa balance commerciale se dégradera, d'autant qu'elle devra importer des équipements requis par la transition énergétique. Il en résultera inéluctablement une destruction d'emplois. En réalité, seule une croissance responsable peut financer la transition énergétique.

La décroissance, enfin, pose un problème éthique d'inégalité intergénérationnelle. Elle a en effet comme conséquence de laisser aux générations futures une capacité restreinte de production d'énergie, et donc de leur imposer notre choix de décroissance.

Quelles nouvelles technologies ?

Le débat public tend à se focaliser sur la production d'électricité décarbonée, dont le développement des énergies solaires et éoliennes.

Pourtant, de nombreuses autres technologies sont requises pour réussir la transition énergétique ; elles concernent la production et les vecteurs d'énergie et en particulier le chauffage et le froid sans passer par l'électricité ni la combustion, les biocarburants, les

carburants de synthèse, l'hydrogène..., mais la décarbonation passe aussi par la maîtrise des consommations. En particulier il faut mettre fin à l'obsolescence programmée des équipements (voitures, équipements ménagers et électroniques) car leur fabrication peut être fortement consommatrice d'énergie, et l'augmentation de leur durée de vie peut se faire sans nouvelles technologies et à faible coût.

L'Agence internationale de l'énergie comme le Giec soulignent qu'on ne pourra pas se passer de certaines technologies : le nucléaire, mais aussi le captage et le stockage du CO₂ (CCS) pour décarboner certaines industries fortement émettrices de CO₂ assez concentré. Il faudra aussi compenser par capture directe les émissions irréductibles de certains secteurs (agriculture, aviation, etc.). La France contribue au développement de stockages dans d'autres pays, notamment en mer du Nord. Mais elle ne peut se contenter d'exporter son CO₂ excédentaire et doit dresser un inventaire précis de son potentiel de stockage et mettre en œuvre des solutions nationales.

Corollaire de la sortie des énergies fossiles, la demande d'électricité va, malgré l'effort de réduction de la consommation énergétique globale, fortement croître ; seul le nucléaire pourra assurer la puissance pilotable requise sauf à importer du gaz ou de l'hydrogène, au détriment de l'autonomie énergétique. La sûreté des centrales nucléaires a été fortement accrue et les conséquences environnementales d'accidents graves, très improbables, seraient marginales. L'Autorité de sûreté a approuvé le concept de stockage profond des déchets à vie longue dans des couches géologiques qui garantissent la séquestration des radionucléides à l'échelle de

temps géologiques. Les principales critiques à l'énergie nucléaire ont donc reçu des réponses concrètes. Un programme d'une série de centrales permettra de réduire fortement leur coût d'investissement et de contribuer à la réindustrialisation française.

SOUVERAINETÉ ÉCONOMIQUE ET ÉCHANGES INTERNATIONAUX DANS LA TRANSITION : QUEL ÉQUILIBRE ?

L'autonomie stratégique et la sécurité d'approvisionnement européenne se dégradent

L'Europe importe 61% de son énergie primaire (comptée en tep) (2019) et cette dépendance s'accroît chaque année. La fermeture anticipée de centrales nucléaires en Belgique et en France accroît cette dépendance. Or la mobilisation d'énergies renouvelables intermittentes (éolien et solaire) sera très insuffisante pour satisfaire la demande. Aussi le programme du gouvernement allemand prévoit l'importation de plusieurs centaines de TWh d'hydrogène du Moyen-Orient ou d'Afrique du Nord. Cet hydrogène contribuerait à une part significative de l'énergie consommée en Allemagne. A l'opposé de cette politique, il est nécessaire de réduire la dépendance européenne aux importations.

L'Europe a pour vocation d'établir un marché unique de l'énergie ; c'est à son niveau que doivent être définis de nouveaux objectifs. L'objectif européen de « sécurité d'approvisionnement » est insuffisant et de moins en moins respecté. Il faut lui substituer un critère d'indépendance exprimé en valeur ; les importations ne devraient à terme pas dépasser 40% de la consommation européenne.

La dépendance aux minerais et métaux rares

Les combustibles ne sont pas tout. La transition énergétique requiert des ressources minérales mal réparties sur la planète ; l'Europe est réticente à exploiter les siennes. Et, surtout, la Chine détient actuellement le monopole de la transformation de nombreux minerais. Le recours à des matériaux de substitution et le recyclage sont possibles. Mais surtout, il faut développer des sites alternatifs d'extraction et de transformation, en Europe (lithium par exemple) ou hors d'Europe, dans des conditions environnementales rigoureuses, mais raisonnables. Les activités extractives européennes devront être protégées aux frontières par des taxes sur les importations ne respectant pas les mêmes critères environnementaux.

ÉQUILIBRE ENTRE LES DIFFÉRENTS OUTILS DE POLITIQUE PUBLIQUE ?

Le prix du CO₂ doit être le moyen de rendre cohérents les différents outils

La réglementation, la taxation, la généralisation du marché d'émissions (« *cap and trade* »), ou les mécanismes de soutiens constituent une palette d'outils à adapter aux situations spécifiques. En particulier une réglementation cohérente avec l'objectif de baisse des émissions est indispensable dans les secteurs dont l'élasticité-prix est faible (véhicules légers, aviation, bâtiments). Les subventions sont nécessaires pour faciliter dans une phase de transition le financement des investissements des particuliers.

Pour assurer une cohérence entre ces différents outils, il faut systématiquement apprécier leur efficacité

à l'aune du prix implicite du CO₂ évité. Seul cet instrument de mesure des politiques publiques permettra d'optimiser l'ensemble de la transition.

La révision du prix du CO₂ (VAC)

Il est nécessaire de réviser la Valeur Action Climat définie en 2019 par France Stratégie : elle est manifestement trop élevée (250 €/t en 2030 et 775 €/t en 2050), alors que des projets de CCS sont rentables pour un prix de CO₂ évité de 100 à 200 €/t. Le maintien de valeurs aussi élevées conduirait à financer des investissements non pertinents.

Enfin, l'Europe doit mettre en place un mécanisme d'ajustement aux frontières, pour corriger les distorsions de concurrence de la part de pays dont les prix explicites ou implicites du CO₂ sont très inférieurs aux prix européens. La mise en œuvre de ce mécanisme devra prendre en compte le risque de rétorsion ou de contournement par les pays les plus concernés (Etats-Unis et Chine).

Donner au consommateur le bon signal-prix

Les fortes hausses du prix des énergies fossiles depuis mi-2020, accentuées par la dégradation de la valeur de l'euro posent un difficile problème de politique publique. La répercussion de ces hausses aux consommateurs est socialement inacceptable, alors même qu'il faudrait leur ajouter, dans les secteurs ne rentrant pas dans le marché des permis d'émissions EU-ETS, une taxe reflétant le prix du CO₂. Les gouvernements d'à peu près tous les pays européens ont pris le parti non seulement de ne pas augmenter les taxes à la hauteur du prix du CO₂ mais d'adoucir l'impact des hausses par différentes mesures qui pèsent assez lourdement sur le budget

des États.

De telles solutions ne peuvent être que temporaires, et il faut que les gouvernements organisent la sortie de ces régimes où ni les carburants ni le CO₂ émis ne sont payés à leur vrai prix.

COMMENT BAISSER LES EMISSIONS DU TRANSPORT ?

Véhicules légers : la SNBC 2 « Avec Mesures Supplémentaires » (AMS) sous-estime les progrès possibles par la technologie et leurs conséquences sur la décarbonation des vecteurs de transport : l'objectif était de 35 % de véhicules électriques (VE) neufs à batterie en 2030 et 10 % de véhicules hybrides rechargeables (VHR) alors que nous sommes passés de moins de 2 % au total en 2018 à plus de 18 % en 2021 (dont 9,8 % de BEV), plus de 25 % en Allemagne et environ 20 % en Europe. La proposition du package Fit-to-55 de la Commission européenne nécessite des ventes de 50 % voire 60 % de nouveaux véhicules électriques ou hybrides rechargeables (2030) : plusieurs constructeurs ont annoncé des proportions encore supérieures.

Actuellement, la réglementation ne différencie pas les véhicules 100 % batterie des hybrides rechargeables. Ceux-ci sont cependant contestables car, dans la pratique, ils émettent beaucoup plus que dans le test WLTP, n'étant pas souvent rechargés et ne roulant donc qu'assez peu en mode électrique tout en déplaçant une masse plus élevée.

L'électrification à 100 % du trafic routier nécessitera une augmentation de la demande électrique d'environ 170 TWh, nettement supérieure à l'évaluation récente de RTE (de 77 TWh à 125 TWh).

La réduction des déplacements par le télétravail, l'autopartage et les reports modaux mérite un approfondissement spécifique tenant compte des leçons de 2020 - 21 et de leurs délais de mise en œuvre pour ce qui est de l'impact des transports en commun et du fret ferroviaire.

Transports terrestres lourds : la SNBC 2 prévoit une majorité de biocarburants alors qu'une autre solution technique, associant batteries et autoroutes électriques est possible (<https://www.ecologie.gouv.fr/autoroute-electrique>) avec beaucoup moins d'émissions et un modèle économique plus réaliste (infrastructure concédée aux gestionnaires d'autoroute).

Aviation commerciale : le secteur aérien considère qu'un gain significatif de consommation d'énergie par passager x km est possible par l'amélioration continue des technologies et par l'optimisation opérationnelle du trafic. Cependant, le développement de biocarburants et de carburants de synthèse produit à partir d'hydrogène et de CO₂ sera le principal vecteur de décarbonation de l'aviation. Plusieurs dizaines de TWh d'électricité pour produire l'hydrogène nécessaire à la production de biokérosène et de kérosène de synthèse devront être mobilisés en France dans la prochaine décennie pour la décarbonation du secteur de l'aviation.

En revanche les motorisations électriques ne peuvent concerner que de tous petits avions (avions école par exemple). Et les perspectives de motorisation Hydrogène sont très lointaines.

Transport maritime : l'ammoniac produit avec de l'hydrogène décarboné ou du méthanol semblent permettre une vraie décarbonation, le gaz en substitution au fuel étant une solution de transition.

Ces transitions technologiques impliquent des investissements majeurs en R&D et en infrastructures qui ne doivent pas être sous-estimés ni différés : **c'est le cumul des émissions de GES envoyées dans l'atmosphère qui compte, pas seulement le « zéro net en 2050 ».**

Il convient de réévaluer le potentiel de production des **hydrocarbures biosourcés**, sans doute surestimé par la SNBC 2 et son scénario AMS. Actuellement la production de biogaz n'est que de 12 TWh à 99 % utilisés hors mobilités ; celle de biocarburants liquides est de 33 TWh.

L'utilisation dans le trafic routier exigerait une augmentation de capacité supplémentaire peu réaliste (Si PL et VUL étaient propulsés à 50 % aux biocarburants, il en faudrait 108 TWh – près du quart de la consommation actuelle d'électricité - en supposant que croissance du trafic et amélioration de la consommation se compensent à 1 %/an.

Le chauffage des bâtiments et les besoins des turbines à gaz en pointe pourraient consommer la majorité du potentiel additionnel. Cependant les besoins de l'aviation (y compris les vols internationaux partant de la France), sont aujourd'hui de 95 TWh ; ils pourraient plafonner à ce niveau. L'utilisation d'hydrocarbures biosourcés est la solution la plus immédiate et la moins coûteuse pour décarboner l'aviation. Il convient de prioriser les biocarburants pour ce mode de transport et de recourir à des carburants de synthèse. Cependant même avec une incorporation de 100 % (50 % dans la SNBC 2), il y aura des émissions résiduelles : des puits de carbone de grande capacité seront nécessaires pour les compenser.

QUELLES EVOLUTIONS POUR LES BATIMENTS NEUFS ET LE PARC EXISTANT ?

Accélérer la décarbonation du parc de bâtiments

Il faut prioritairement traiter les logements (60 % des émissions du secteur résidentiel et tertiaire), mais aussi les autres bâtiments, en particulier les bâtiments publics. Il faut privilégier la sortie des énergies fossiles et donc l'électrification du parc, avant la stratégie d'isolation des bâtiments. Celle-ci est plus complexe et plus longue et, d'ailleurs, les objectifs de rénovation du parc de logement n'ont jamais été atteints dans le passé. Elle est aussi plus coûteuse (Coût estimé pour amener les seules passoires thermiques au niveau BBC : au moins 150 milliards d'euros). Enfin, l'appareil productif français n'est pas en état aujourd'hui d'augmenter fortement le rythme des rénovations et son adaptation sera longue. Au contraire le passage, suivant les cas, au chauffage électrique (simple, peu coûteux) ou à la pompe à chaleur (plus coûteuse mais permettant une réduction plus forte des émissions) permet de décarboner rapidement à moindre coût tout en facilitant l'introduction progressive d'énergies renouvelables. L'isolation des bâtiments, certes nécessaire, peut être étalée dans le temps.

Par ailleurs, la population française augmenterait d'environ 7 millions d'habitants d'ici 2050 dans le scénario central de l'INSEE, mais le besoin de logements diminuera localement : une appréciation fine des besoins, des coûts et une politique régionalisée peuvent amener à privilégier la démolition de certaines passoires thermiques plutôt que leur rénovation.

Géothermie et stockage de chaleur

Le secteur résidentiel et tertiaire contribue pour 23 % aux émissions française de gaz à effet de serre. Le secteur tertiaire a consommé 95 TWh de combustibles fossiles en 2020, et le secteur résidentiel 183 TWh soit un total de 278 TWh. Dans ce contexte, et comme vient de le rappeler le Haut-Commissariat au plan, la relance en France de la géothermie, chaleur décarbonée par excellence, s'impose. En effet, en France métropolitaine, la géothermie de surface fournit 3 % de la chaleur renouvelable, soit autour d'1 % de la chaleur produite en France – la production de froid est négligeable aujourd'hui. Or le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) estime en France, en additionnant les différents gisements de géothermie de surface, à 100 TWh annuels le potentiel d'économie de gaz d'ici 15 à 20 ans. Ainsi, en ce qui concerne la métropole du Grand Paris, la géothermie de surface pourrait produire 25 TWh par an, ce qui représente plus de la moitié de ses besoins en chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation. La géothermie de surface peut également fournir du froid, tout aussi décarboné, ce qui va être déterminant car les besoins de refroidissement sont voués à augmenter avec la hausse des températures moyennes induite par le changement climatique.

En complément de cette géothermie classique, qui utilise l'énergie « naturellement » disponible dans le sol à chaque instant, il faut également stocker dans le sous-sol de la chaleur lorsqu'elle est disponible, issue de sources renouvelables et peu coûteuses en vue d'une utilisation lors de la saison froide suivante, et inversement pour le froid lors de la saison chaude suivante. Ce stockage inter-saisonnier de chaleur dans le sous-sol permettrait de multiplier par deux le

potentiel déjà considérable de la géothermie de surface, tout en apportant des solutions élégantes à la récupération de la chaleur intermittente. Le stockage de chaleur est encore peu développé en France mais déjà largement déployé dans les pays nordiques, aux Pays Bas et en Suisse.

Réduire l'impact carbone des constructions

La RE2020 qui impose pour la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ des objectifs de résultat et non de moyens est sur le principe préférable à des impositions de matériaux ou de solutions techniques ; elle permet aux entreprises de s'adapter et favorise l'innovation. La performance étant très liée aux choix techniques, mais aussi aux conditions de mise en œuvre, des bilans de suivi doivent être mis en place pour mesurer la performance énergétique et en émissions carbone réelles et l'impact sur les coûts de construction afin de la faire évoluer si nécessaire. La création de labels est aussi une mesure efficace.

LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Les réseaux électriques actuels sont confrontés à de nouveaux défis liés à la transition énergétique. L'enjeu essentiel pour le réseau français est d'accueillir des énergies décentralisées, intermittentes et peu pilotables, tout en maintenant l'équilibre du réseau. Le développement de la production décentralisée conduit à injecter de l'électricité sur des réseaux de distribution conçus pour l'acheminer et non la collecter. Il faudra que les réseaux incluent des capacités de stockage par batteries et deviennent intelligents (*smart grids*) pour maîtriser les pointes de consommation.

L'autonomie du système électrique peut être grandement améliorée en stockant l'électricité dans des Step (stations de transfert d'énergie par pompage). Aujourd'hui, la puissance installée de Step est de 5 GW avec une durée maximale de fonctionnement de quelques heures. Il convient de lancer rapidement la réalisation des 1,5 GW de Step prévues par la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), et d'actualiser l'identification de sites dans les massifs montagneux français, notamment en valorisant des retenues déjà existantes.

QUELLE REPARTITION PAR SECTEUR DE L'EFFORT SUPPLEMENTAIRE POUR LE REHAUSSEMENT DE L'OBJECTIF CLIMATIQUE A L'HORIZON 2030 ?

Avant de répartir l'effort, est-il permis de le discuter ? Depuis trente ans (1990-2020), les émissions de CO₂ allemandes par habitant sont à peu près le double des émissions françaises alors même que l'Allemagne bénéficiait d'un point de départ très favorable en opérant sa réunification : les émissions de l'Allemagne de l'Est étaient extrêmement élevées, et les réductions faciles à obtenir.

Le programme européen Fit-to-55 prévoit de porter les objectifs de réduction (1990-2030) de - 40% à - 55% ; c'est le total des émissions qui est considéré et non les émissions par tête. Dans la période 1990-2020, la population établie en France a augmenté de 15 % contre 5 % pour la population allemande : ne faudrait-il pas en tenir compte ?

L'Allemagne s'apprête à entreprendre sa sortie du charbon, que la France a faite dans la décennie 1980. L'Allemagne va pouvoir remplacer – exercice assez facile – des centrales fortement émettrices de

CO₂ par des centrales à gaz 60 % moins émettrices par kWh. Mais ce sera encore beaucoup : son mix électrique qui est actuellement quatre fois plus carboné que le mix français descendra au double. Est-il normal que la France qui a déjà effectuée cette étape de la transition ait à réduire ses émissions dans le même pourcentage que les pays européens très carbonés qui jusqu'à présent n'ont fait que peu d'efforts ? L'objectif « - 55 % en 2030 » en lieu et place de l'objectif antérieur de - 40 % sera inaccessible pour la France ! De 1990 à 2019 (2020 fût une année exceptionnelle) les émissions françaises n'ont baissé que de 20 %. Est-il sérieux de penser qu'après - 20 % en trente ans, on puisse atteindre - 55 % en huit années supplémentaires ? Avant de répartir la réduction entre secteurs et sauf à organiser le rationnement, la France doit sérieusement discuter l'objectif global.

COMMENT ORGANISER LA FIN DES ENERGIES FOSSILES A L'HORIZON 2050 ?

En guise de conclusion

Sortir des énergies fossiles nécessite de promouvoir l'électrification de nombreuses activités et de modifier profondément l'infrastructure énergétique française : la production, les réseaux de transport, les terminaux d'utilisation sont à remplacer, renforcer ou renouveler. Ce n'est pas une simple transition, mais une révolution, qui sera coûteuse, d'autant que cette sortie des énergies fossiles détruira des emplois si elle est conduite en s'affranchissant des considérations techniques et économiques. Elle peut au contraire en créer si la France veut se situer au cœur de l'Europe de l'électricité. La transition énergétique

présente un paradoxe : les consommations d'énergie primaires fossiles doivent baisser ; mais les énergies primaires décarbonées doivent croître fortement. Le potentiel des biocarburants est plus limité que les hypothèses SNBC (cf. récente étude de France Stratégie) et les biocarburants seront réservés à des usages pour lesquels ils ne sont pas substituables (aviation...). L'électricité décarbonée doit donc prendre une place prépondérante parmi les énergies primaires de demain (les deux tiers alors qu'elle n'en représente qu'un quart aujourd'hui).

Le marché potentiel d'électricité décarbonée, exportations comprises, est supérieur d'au moins 70 % au marché actuel. De surcroît, une stratégie de surinvestissement en électricité pilotable est une stratégie « no regret », car des excédents, s'il y en avait, trouveraient facilement une demande dans les pays voisins : ils déclarent dès aujourd'hui se placer en importateurs nets à moyen terme. En outre un marché considérable de carburants de synthèse, en particulier pour l'aviation, est devant nous : il nécessite beaucoup d'électricité.

Un mix 100 % renouvelable pour les quantités visées, outre les défis techniques à résoudre, serait très coûteux et finalement irréaliste. Il faudrait lui associer un système de stockage-déstockage pour pallier l'intermittence des périodes ni ensoleillées ni venteuses. Ce système aurait nécessairement une forte capacité (des dizaines de GW), mais un faible facteur de charge (un peu plus de 10 %).

De multiples techniques d'ores et déjà disponibles sont à mobiliser pour réussir la transition énergétique. Il y a un large consensus sur la nécessité de promouvoir les pompes à chaleur, utiliser plus la géothermie de surface, améliorer l'isolation des lo-

gements, électrifier les mobilités. Deux leviers particuliers sont aussi essentiels, et apportent de façon certaine un bénéfice :

1. Le captage et le stockage du CO₂ (CCS).
2. La réalisation en série de centrales nucléaires.