

Technologies bas carbone et trajectoires de décarbonation profonde, l'analyse de l'ANCRE

Nathalie Alazard-Toux, Patrick Criqui, Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, Roland Berthomieu, Laetitia Chevallet, Sylvie Gentier, Emmanuel Hache, Elisabeth Le Net, Philippe Menanteau, Françoise Thais¹

La COP21 a réaffirmé le rôle indispensable de la réduction des émissions de CO₂ dans la lutte contre le réchauffement climatique. À cette fin, les nouvelles technologies peuvent constituer un levier déterminant. Une étude réalisée par l'ANCRE souligne la nécessité d'investir massivement dans ces technologies pour aboutir à une décarbonation profonde du système énergétique mondial.

En décembre dernier, la France accueillait et présidait la 21^{ème} Conférence annuelle des Parties – COP21 – dont l'objectif était d'aboutir à un accord universel pour lutter efficacement contre le dérèglement climatique et accélérer la transition vers des sociétés et des économies résilientes et sobres en carbone.

L'ANCRE qui regroupe les grands organismes de recherche travaillant en France sur les questions énergétiques a souhaité apporter une expertise sur le rôle que les technologies pourraient jouer dans une stratégie ambitieuse de réduction des émissions de CO₂ à l'échelle globale. Dans ce but, les experts de l'ANCRE¹ ont repris le concept de « Stabilization Wedges » initialement formulé par S. Pacala et R. Socolow (2004), permettant d'estimer le rôle respectif des grandes options technologiques à notre disposition pour orienter le système énergétique mondial vers une décarbonation profonde.

L'étude « Decarbonization Wedges » réalisée par l'ANCRE s'appuie sur deux approches complémentaires (ANCRE, 2015).

La première a consisté à travailler sur les trajectoires construites dans le cadre du projet *Deep Decarbonisation Pathways*² des Nations Unies (DDPP) pour les 16 pays les plus gros émetteurs de CO₂ dans le monde (74 % des émissions mondiales). Ces trajectoires visent à une décarbonation profonde du système énergétique des pays concernés à l'horizon 2050, en ligne avec une division par deux des émissions mondiales de CO₂ par rapport à 1990 (DDPP, 2015). L'analyse détaillée des choix réalisés par chaque pays a permis d'identifier les principales technologies ou groupes de technologies bas-carbone prépondérants et d'évaluer leurs contributions respectives à l'objectif global. Ce premier travail a également abouti à un regroupement des différents pays en 4 sous-ensembles distincts au sein desquels s'observe une certaine convergence dans les choix des leviers privilégiés de décarbonation.

1. ANCRE, 2015, Decarbonization Wedges – Report. Rapport disponible sur le site internet de l'ANCRE : <http://www.allianceenergie.fr/>

2. <http://deepdecarbonization.org/>

L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

Créée en 2009 à l'initiative des ministres en charge de l'Écologie, de l'Énergie et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, l'ANCRE a pour mission de mieux coordonner et renforcer l'efficacité des recherches sur l'énergie menées par les organismes publics nationaux. Elle participe à la mise en œuvre de la stratégie française de R&D dans ce secteur. Elle rassemble en tant que membres fondateurs le CEA, le CNRS, la CPU et l'IFPEN, ainsi que tous les membres associés suivants : ANDRA, BRGM, CDEFI, IRSTEA, CIRAD, CSTB, IFREMER, INERIS, INRA, IFSTTAR, INRIA, IRD, IRSN, LNE, ONERA.

Dans la seconde approche, l'ensemble des groupes programmatiques de l'ANCRE – 5 groupes spécialisés sur les technologies d'offre d'énergie, 3 groupes centrés sur les technologies de la demande d'énergie et un groupe focalisé sur les technologies liées au stockage de l'énergie et à la gestion des réseaux – ont été mobilisés afin, et de manière indépendante de la première partie du travail, d'identifier les technologies clés qui permettront – selon leurs expertises – une décarbonation profonde du système énergétique mondial. Vingt-cinq technologies majeures ont ainsi été listées et étudiées. Chacune d'entre elles a fait l'objet d'une analyse descriptive comprenant notamment les développements les plus récents dans les différentes régions du monde, une évaluation de sa maturité, de son potentiel de développement, ainsi que de sa contribution à la réduction des émissions de CO₂ à l'horizon 2050. Ce travail a également permis la mise en évidence des verrous à lever (R&D, économique, réglementaire, ressources et impacts environnementaux, sécurité et faisabilité sociotechnique) pour chacune de ces filières.

1. Contribution des différentes technologies à la décarbonation : les contributions nationales

1.1 Le projet *Deep Decarbonization Pathways* (DDPP)

L'objectif du projet DDPP est d'illustrer comment il pourrait être possible de concilier les objectifs nationaux de développement économique et des trajectoires de décarbonation profonde des systèmes énergétiques à l'horizon 2050, de façon à ne pas dépasser une hausse des températures de 2°C d'ici 2100. Le projet est financé et dirigé conjointement par SDSN (*Sustainable Development Solutions Network*) et l'IDDRI³ (Institut du Développement Durable et des Relations Internationales).

Le projet DDPP rassemble des équipes nationales de recherche de 16 pays à des niveaux de développement très hétérogènes et qui représentent près des trois quarts des émissions mondiales de CO₂ : l'Afrique du Sud, l'Allemagne, l'Australie, le Brésil, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis, la France, la Grande Bretagne, l'Inde, l'Indonésie, l'Italie, le Japon, le Mexique, et la Russie. Chaque équipe de recherche a développé une ou plusieurs trajectoires de décarbonation à l'horizon 2050 en s'intéressant principalement à sa ou leur faisabilité technique.

Les trajectoires proposées par les équipes de recherche s'appuient sur trois principaux piliers de décarbonation :

- L'efficacité énergétique
- La décarbonation de l'électricité
- L'introduction de vecteurs énergétiques décarbonés.

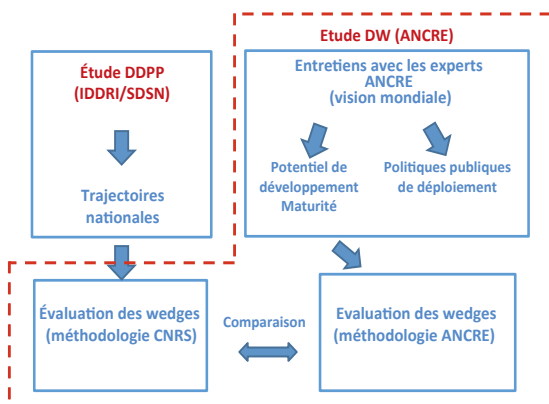


Figure 1 : Périmètre de l'étude DW

3. Pour plus d'informations, voir www.iddri.org

Ces trois piliers sont communs à l'ensemble des pays mais leur importance relative varie considérablement de l'un à l'autre en fonction des situations nationales. Les conditions socio-économiques et les besoins nouveaux associés à la croissance économique, la disponibilité en ressources énergétiques, les stratégies nationales de développement des énergies renouvelables, du nucléaire, des dispositifs de captage et de stockage du CO₂ (CCS) ou d'autres technologies, constituent, par exemple, des facteurs de différenciation importants des trajectoires nationales.

En s'appuyant sur ces trajectoires de décarbonation, l'objectif du travail réalisé par l'ANCRE a été de caractériser les stratégies suivies par les 16 pays selon leur niveau de développement économique et d'intensité carbone, et d'identifier les principaux leviers de décarbonation utilisés.

1.2 Approche méthodologique

Pour quantifier les leviers de décarbonation, l'ANCRE a utilisé le concept de « wedge » (coin). L'idée de « wedge » proposée par S. Pacala et R. Socolow (2004) doit être comprise comme une action ou une technologie générique conduisant à une réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et contribuant ainsi à infléchir la trajectoire d'émissions vers une trajectoire compatible avec une hausse des températures inférieure à 2°C.

La méthodologie développée par le CNRS (Université Grenoble Alpes) s'est appuyée sur la méthode LMDI (*Logarithmic Mean Divisia Index*) popularisée notamment par Ang et al. (2003) et appliquée ici aux bilans énergétiques nationaux élaborés dans le cadre de DDPP. Grâce à une série d'équations de Kaya⁴, trois catégories de facteurs expliquent les variations des émissions observées : une variable d'activité, une variable d'intensité énergétique sectorielle et une variable d'intensité carbone sectorielle. Pour chaque secteur, l'effet activité

4. L'identité de Kaya s'exprime de la façon suivante (Kaya, 1989) :

$$CO_2 = Population * \left(\frac{GDP}{Population} \right) * \left(\frac{Primary Energy}{GDP} \right) * \frac{CO_2}{Primary Energy} / Primart$$

permet de construire une situation contrefactuelle en faisant l'hypothèse d'intensités énergie et carbone constantes.

Cette méthodologie permet ainsi d'évaluer, sans nécessité de définir un scénario de référence, la contribution des trois piliers de décarbonation (efficacité énergétique, décarbonation des vecteurs énergétiques et transformation du mix énergétique) et d'identifier 17 principaux « wedges » (Tableau 1) :

- 6 « wedges » se situent du côté de la demande et correspondent à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la réduction de l'intensité carbone dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports.
- 11 « wedges » se situent dans le secteur de la production d'électricité : substitution charbon/gaz, gaz plus CCS, charbon plus CCS, nucléaire, hydraulique, éolien *onshore*, éolien *offshore*, solaire photovoltaïque (PV), solaire à concentration, biomasse et autres (géothermie par exemple).

Pour réaliser cette analyse, les 16 pays ont été regroupés en 4 groupes (Figure 2) : les pays émergents peu émetteurs de carbone (LCEC – *low carbon emerging countries*), les pays émergents émetteurs de carbone (MCEC – *medium carbon emerging countries*), les pays industrialisés émetteurs de carbone (MCIC – *medium carbon industrialized countries*) et les pays industrialisés très émetteurs de carbone (HCIC – *high carbon industrialized countries*).

1.3 Les principaux wedges pour une décarbonation profonde

Avec la méthode proposée, les émissions en 2050 pour les 16 pays considérés seraient de 51 GtCO₂ dans la situation contrefactuelle (Figure 3), contre 22 GtCO₂ en 2010, soit plus qu'un doublement des émissions globales. En revanche, les émissions correspondant aux trajectoires de décarbonation ne représentent que 11 GtCO₂ en 2050, soit une division par deux par rapport à la situation actuelle.

En ce qui concerne les « wedges », on observe deux résultats intéressants: ceux portant sur la demande sont presque aussi importants que ceux du secteur électrique, en particulier en début de période. D'autre part, les transformations structurelles et les évolutions techniques

End-use sectors	Power sector
- Building decarbonization	- Coal CCS
- Building efficiency	- Coal to Gas
- Transport efficiency	- Gas CCS
- Transport decarbonization	- Nuclear
- Industry decarbonization	- Hydro
- Industry efficiency	- Wind onshore
	- Wind offshore
Others	- Solar PV
	- Solar thermal
	- Biomass

Tableau 1 : Les wedges dans DDPP

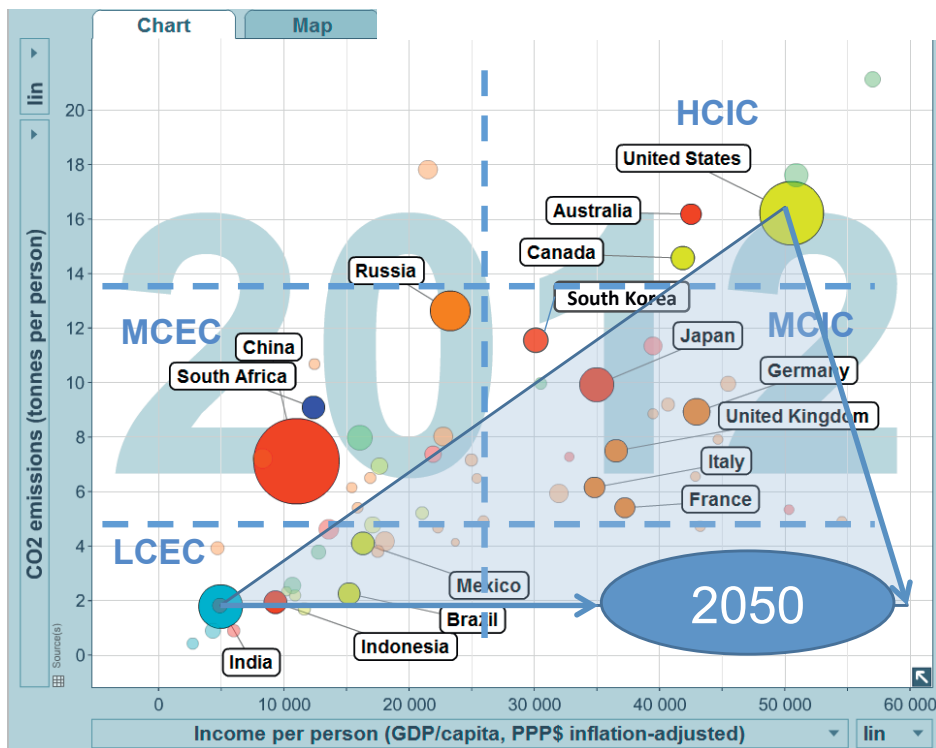


Figure 2 : Les groupes de pays dans DDPP
Source : ANCRE avec GAPMINDER

dans le secteur de l'industrie joueront un rôle essentiel dans la décarbonation.

Pour les 16 pays étudiés, la demande d'énergie finale atteindrait 8 700 Mtep en 2050 contre 6 200 Mtep en 2010, ce qui correspond à une faible augmentation de la consommation d'énergie par habitant. Le mix énergétique évoluerait considérablement avec une très forte baisse de la part des combustibles fossiles qui passerait de 71 % à moins de 50 % en 2050,

et dans le même temps un doublement de la contribution de l'électricité à la consommation finale pour atteindre 38 % en 2050 (20 % en 2015).

L'analyse des émissions du secteur électrique montre enfin le rôle fondamental qu'il devrait prendre dans le processus de décarbonation. Ainsi, alors que la production électrique globale ferait plus que doubler entre 2010 et 2050, les émissions totales du secteur seraient divisées

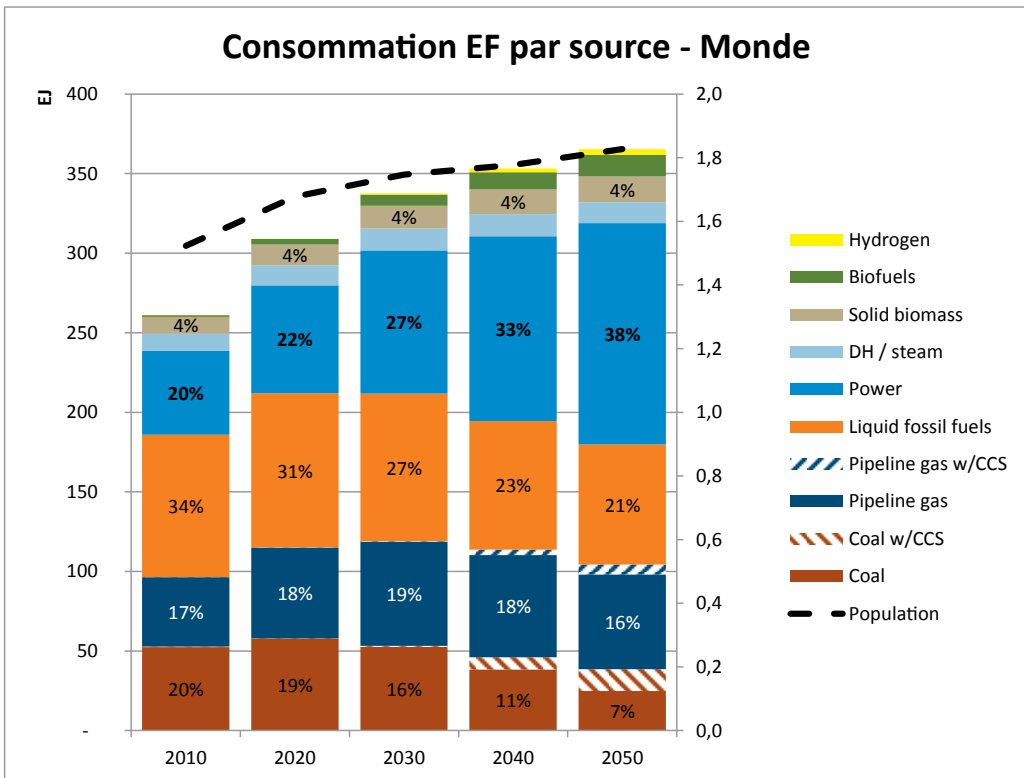
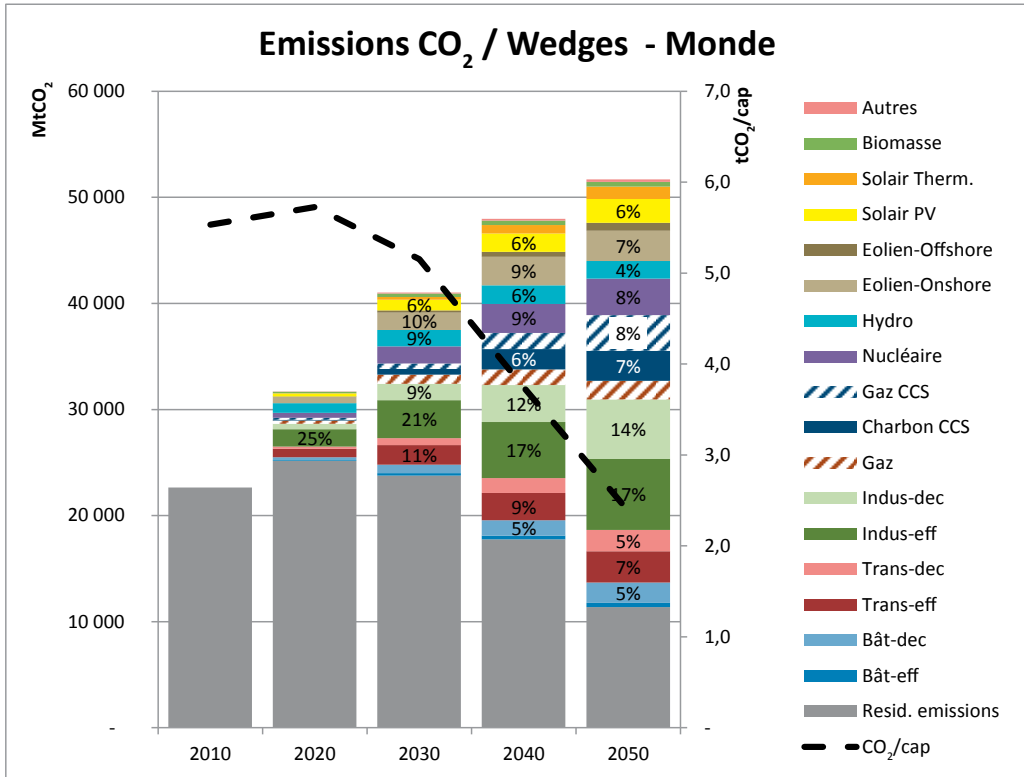
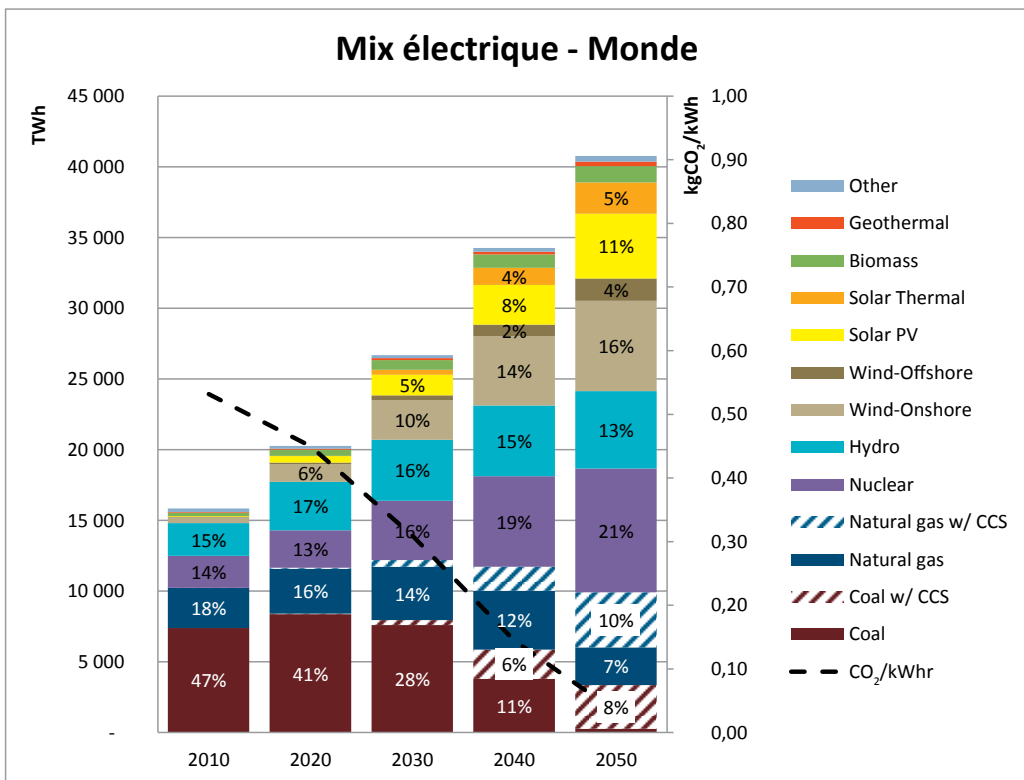
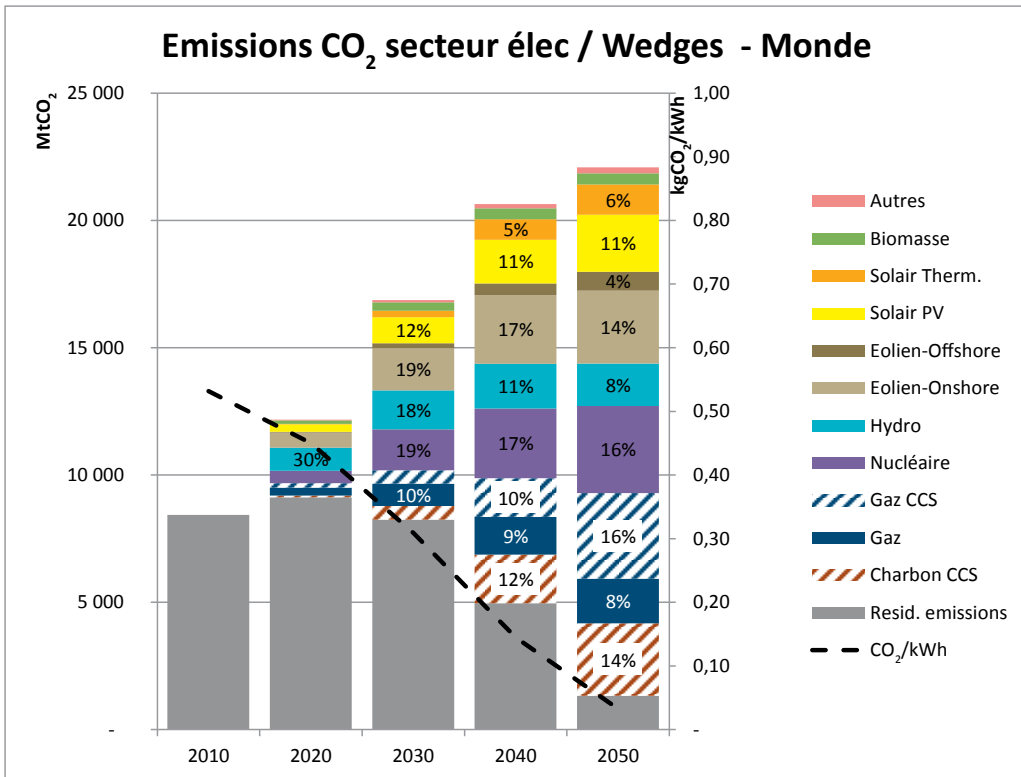


Figure 3 : Trajectoires d'émissions - Monde - Source : ANCRE



par un facteur supérieur à 4. Le mix électrique serait dans le même temps totalement modifié avec 90% de la production provenant de sources non émettrices de CO₂, parmi lesquelles, 54 % de renouvelables, 21 % de nucléaire et le solde étant assuré par des dispositifs de CCS. Le secteur électrique serait ainsi décarboné en quasi-totalité en 2050 avec un contenu moyen en CO₂ qui passerait de 530 gCO₂/kWh aujourd'hui à 33 gCO₂/kWh en 2050.

2. Une vision d'experts sur les technologies clés

2.1 Objectifs et contenu de l'étude

Ce deuxième volet de l'étude DW a mobilisé les experts de l'ANCRE pour offrir une vision mondiale des différentes technologies bas-carbone à 2050 et explorer le potentiel de développement des technologies clés. Pour atteindre une décarbonation profonde des systèmes énergétiques, il est certain que de nombreuses transformations devront s'opérer et qu'elles devront toucher à la fois les comportements des agents, les institutions et les technologies. Toutefois, l'étude *Decarbonization Wedges* (DW) s'est principalement concentrée sur la description des potentiels liés à la technologie en demandant aux experts de l'ANCRE de :

- Décrire les technologies (ou secteurs de consommation finale) et leurs développements récents dans les différentes régions du monde ;
- Estimer les niveaux de maturité des technologies, leur potentiel de développement et leur contribution à la réduction des émissions de CO₂ en 2050 ;
- Evaluer les performances et les principaux verrous identifiés pour chacune des technologies (R&D, économique, réglementation et régulation, sécurité et sûreté, faisabilité sociotechnique) ;
- Qualifier la nature des innovations à réaliser (radicale ou incrémentale) pour lever les verrous identifiés.

Le potentiel total *in fine* issu de cet exercice s'appuie sur une vision très dynamique de la recherche et de l'innovation, susceptible

d'impulser des changements importants. La vision proposée dans l'étude DW présente ainsi une contribution maximale de la technologie, dans une hypothèse d'engagement résolu vers un monde bas carbone, et diffère en cela des études classiques à base de scénarios qui décrivent des trajectoires précises intégrant de multiples contraintes. Cette analyse a été menée en se fondant sur un découpage en 108 technologies, regroupées ensuite en grandes familles⁵. Nous nous intéresserons ici d'abord à l'analyse des verrous tels qu'ils ont été décrits par les experts de l'ANCRE.

2.2 Les principaux verrous au développement des technologies bas-carbone

Pour apprécier les principaux verrous limitant le développement actuel des technologies, 6 grands domaines avaient au préalable été identifiés :

- La recherche et développement (R&D)
- La dimension économique
- La réglementation
- L'accès aux ressources / l'environnement
- La sûreté et la sécurité
- La faisabilité et/ou l'acceptabilité

On notera que, pour chaque technologie, il a été demandé aux experts d'évaluer les verrous par ordre d'importance relative (du plus fort au moins fort).

Le graphique suivant (Figure 4) indique que le principal verrou, toutes technologies confondues, est la capacité de celles-ci à se développer dans un monde concurrentiel, avec des signaux-prix aujourd'hui insuffisants et des difficultés d'accès au financement. L'instabilité des prix sur les marchés (y compris ceux des énergies fossiles) est aussi perçue comme induisant des incertitudes qui peuvent s'avérer des freins.

En contrepoint de cette évaluation, la réglementation apparaît dans cette étude au moins autant comme un risque que comme une opportunité. Dans certains domaines, la réglementation est considérée comme un instrument

5. Le détail des résultats obtenus est disponible dans le rapport complet de l'étude DW publié par l'ANCRE : <http://www.allianceenergie.fr/Etudes-et-rapports.aspx>

important pour accélérer la diffusion des nouvelles technologies, mais les doutes quant à sa stabilité, sa prévisibilité ou l'efficacité du cadre réglementaire peuvent également constituer des freins. La possibilité de fournir un effort massivement accru de R&D est aussi un point majeur. Cette analyse rejoint celle de l'Agence internationale de l'énergie qui a exprimé en mai 2015 (AIE, 2015) qu'il serait probablement nécessaire de tripler les dépenses de R&D pour atteindre l'objectif d'une hausse des températures inférieure à 2°C. Le quatrième verrou est celui de la faisabilité sociale du développement des technologies, à égalité avec la question des impacts sur l'environnement et l'épuisement des ressources.

Si on examine les verrous de façon plus détaillée par grandes familles de technologies, on observe que le niveau jugé insuffisant de R&D apparaît comme un verrou significatif pour la plupart d'entre elles, ce qui traduit à la fois le fait que des progrès complémentaires sont attendus (voir notamment la section 3.3) et que l'effort actuel n'est pas à la hauteur des enjeux. Quelques technologies ont déjà un stade de maturité technologique élevé, mais des efforts de R&D supplémentaires sont encore nécessaires pour améliorer leurs performances et accélérer leur déploiement. Les cellules photovoltaïques

en silicium cristallin, par exemple, peuvent être considérées comme des technologies déjà matures, ce qui n'empêche nullement que des efforts très significatifs restent à réaliser pour des technologies plus récentes comme utilisant les pérovskites.

Le verrou « réglementation » apparaît également comme un enjeu d'importance, notamment pour les technologies renouvelables (biomasse, éolien, hydraulique, solaire) et le CCS. La réglementation existante peut être inadéquate et désincitative (subventions aux énergies fossiles), ou constituer de fortes barrières au déploiement des nouvelles solutions (permis, décrets, procédures d'autorisation publique, normes environnementales parfois). Les changements fréquents dans la réglementation sont également un sujet important (instabilité des tarifs de rachat de l'énergie solaire par exemple) et, enfin, des divergences internationales de régulation parfois fortes peuvent conduire à des inefficacités flagrantes.

2.3 Innovations radicales ou incrémentales

Les experts de l'ANCRE ont, par ailleurs, qualifié la nature des innovations attendues, entre ruptures et progrès incrémentaux. L'analyse porte sur l'ensemble de la période jusqu'en 2050 et donc au-delà de l'horizon des

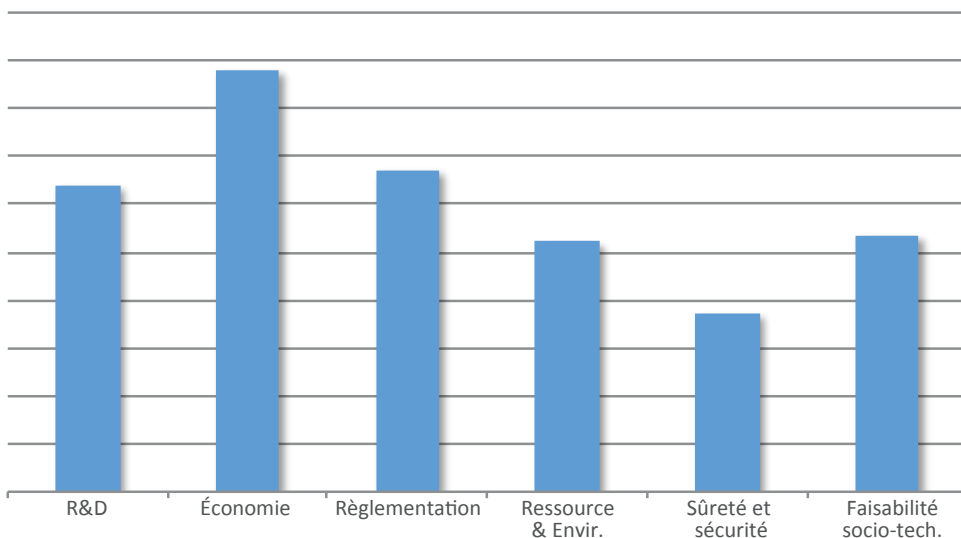


Figure 4 : Les principaux verrous identifiés dans l'étude DW - Source : ANCRE

Note: cette figure montre les verrous les plus significatifs pour toutes les technologies sur une échelle linéaire (occurrence des réponses par verrou et rang indiqué dans chaque réponse).

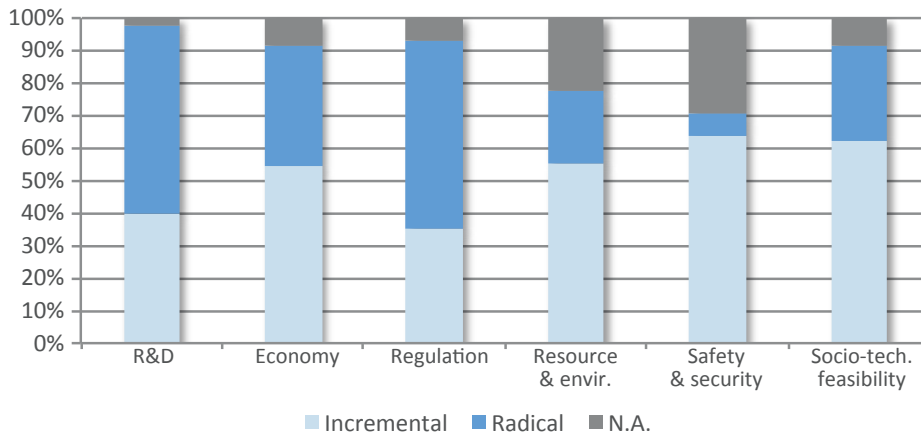


Figure 5 – Innovations radicales et incrémentales par verrou - Source: ANCRE

Note: ce graphe illustre le pourcentage d'innovations estimé pour toutes les technologies (la partie grise correspond soit à une non-réponse soit à un besoin faible en innovation).

innovations technologiques incrémentales. On observe d'abord que des innovations radicales sont attendues sur les technologies elles-mêmes pour dépasser les barrières qui existent aujourd'hui en matière de performances ou de fonctionnalités. Mais des innovations de rupture sont également attendues dans d'autres domaines tels que les signaux-prix, les normes, les transferts de technologie, ou la conception et l'organisation des marchés (marché de l'électricité, marché du carbone, financement, transferts vers les pays du Sud). Clairement, les experts attendent des évolutions des technologies elles-mêmes, mais également de leur environnement de sélection pour qu'elles puissent atteindre leur potentiel maximum.

L'analyse par famille de technologies fait apparaître certaines disparités qui reflètent certainement l'inégale maturité des filières et la vision qu'en ont les experts. Les résultats obtenus ne sont toutefois pas vraiment surprenants puisque parmi les technologies qui semblent nécessiter les plus fortes ruptures, on retrouve la valorisation de la biomasse, le CCS, les réseaux, l'efficacité énergétique dans l'industrie et les énergies marines.

2.4 Quels potentiels de décarbonation profonde liés à la technologie ?

Les experts de l'ANCRE ont également estimé, pour chaque technologie identifiée,

sa contribution à la réduction des émissions de GES dans une perspective de forte dynamique de recherche et d'innovation, accompagnée de mesures aptes à promouvoir l'adoption des nouvelles technologies⁶. Ces potentiels technologiques ont été comparés aux réductions d'émissions sur lesquelles s'appuient les trajectoires de décarbonation profonde élaborées dans le cadre de DDPP (Figure 3).

Rappelons que l'estimation des potentiels réalisée par l'ANCRE est mondiale, alors que DDPP ne concerne que les 16 pays les plus émetteurs. Par ailleurs, les trajectoires DDPP correspondent à des scénarios bouclés présentant une forte cohérence interne, alors que l'analyse de l'ANCRE porte sur des estimations réalisées indépendamment les unes des autres et dans un contexte supposé très favorable à l'innovation⁷. Néanmoins, et peut être de façon surprenante, on observe que les ordres

6. On admettra que l'exercice était particulièrement difficile malgré les nombreux échanges et recoupements auquel il a donné lieu. Il ne vise donc au mieux qu'à traduire la vision qu'ont les technologues des ordres de grandeur des potentiels d'abattement associés à ces technologies, sans prétendre qu'il s'agit là d'une évaluation à caractère scientifique.

7. La méthode proposée conduit certainement à une surestimation des potentiels de chaque technologie, mais on observera également que toutes les technologies susceptibles de contribuer aux réductions d'émissions n'ont pas été décrites.

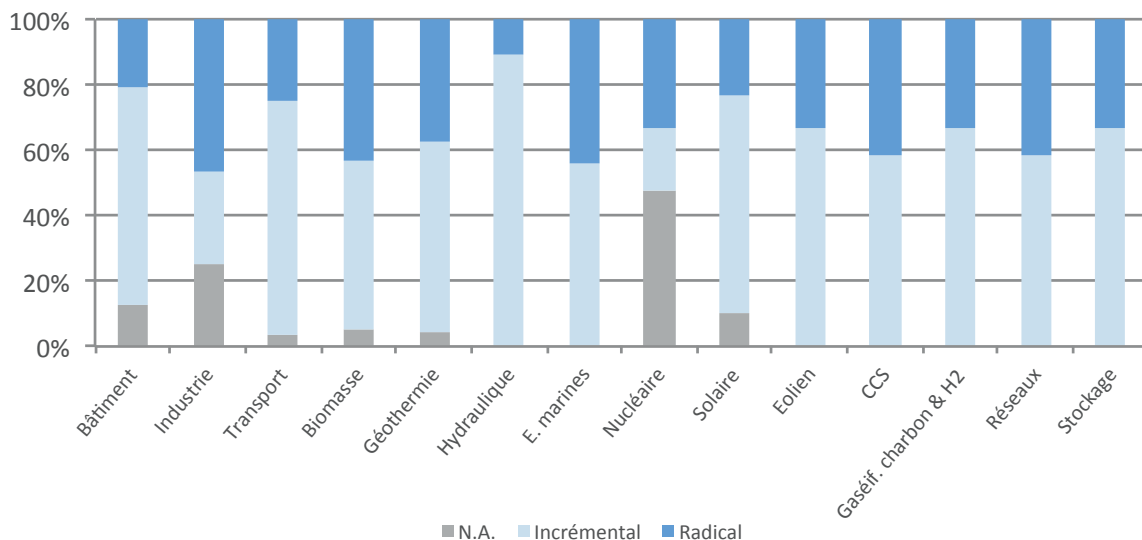


Figure 6 – Innovations radicales et incrémentales selon les familles de technologies

Source : ANCRE

Note: ce graphe illustre le pourcentage d'innovations estimé pour toutes les technologies (la partie grise correspond soit à une non-réponse soit à un besoin faible en innovation).

de grandeur des potentiels nécessaires pour une réduction des émissions compatible avec un scénario 2°C tels qu'ils ressortent des deux études sont finalement assez peu éloignés. Les potentiels de réduction d'émissions identifiés par l'ANCRE évoluent de moins de 20 milliards de tonnes de CO₂ en 2020 à environ 50 milliards de tonnes en 2050. Ils se situent logiquement au-dessus des besoins de réduction d'émissions compatibles avec les trajectoires proposées dans DDPP (38 milliards de tonnes de CO₂ en 2050).

Pour le court terme, les potentiels technologiques seraient nettement supérieurs aux besoins de réduction exprimés dans DDPP, mais la marge d'action se réduit fortement par la suite. En 2050, l'écart entre les besoins exprimés et les potentiels estimés resterait positif, mais il est alors beaucoup plus faible. Cela signifie que le scénario 2°C resterait techniquement faisable, mais sous condition d'efforts en R&D très significatifs dans les périodes antérieures.

Les visions proposées par les deux études présentent également des similitudes dans la contribution relative des différentes technologies et des différents secteurs. Selon les experts de l'ANCRE, les principales technologies d'offre d'énergie capables d'accélérer le passage à la

trajectoire 2°C sont le solaire (10 % du potentiel global de réduction), l'éolien (9 %), les réacteurs nucléaires de 3^{ème} génération (8,5 %). L'hydraulique (principalement dans les pays du Sud), la biomasse (en prenant en compte la chaleur, les biocarburants et l'électricité) ainsi que les technologies de captage et de stockage du CO₂ jouent également un rôle, mais dans une moindre mesure. Les résultats obtenus sur les « wedges » à partir de DDPP sont de fait assez comparables, si l'on excepte le CCS, qui joue souvent le rôle de technologie « de bouclage » dans les exercices scénarisés à fortes réductions d'émissions. L'écart avec la vision moins optimiste de l'ANCRE pourrait ainsi s'expliquer par des raisons techniques et probablement aussi par une perception moins favorable de la technologie par les experts français⁸.

En ce qui concerne les usages finals, les résultats des deux études présentent également une certaine cohérence. Si DDPP est moins optimiste que l'ANCRE sur les perspectives de réduction d'émissions associées au

8. Les experts de l'ANCRE devaient se placer dans une perspective internationale mais on ne peut exclure un biais lié à l'origine exclusivement française de ceux-ci.

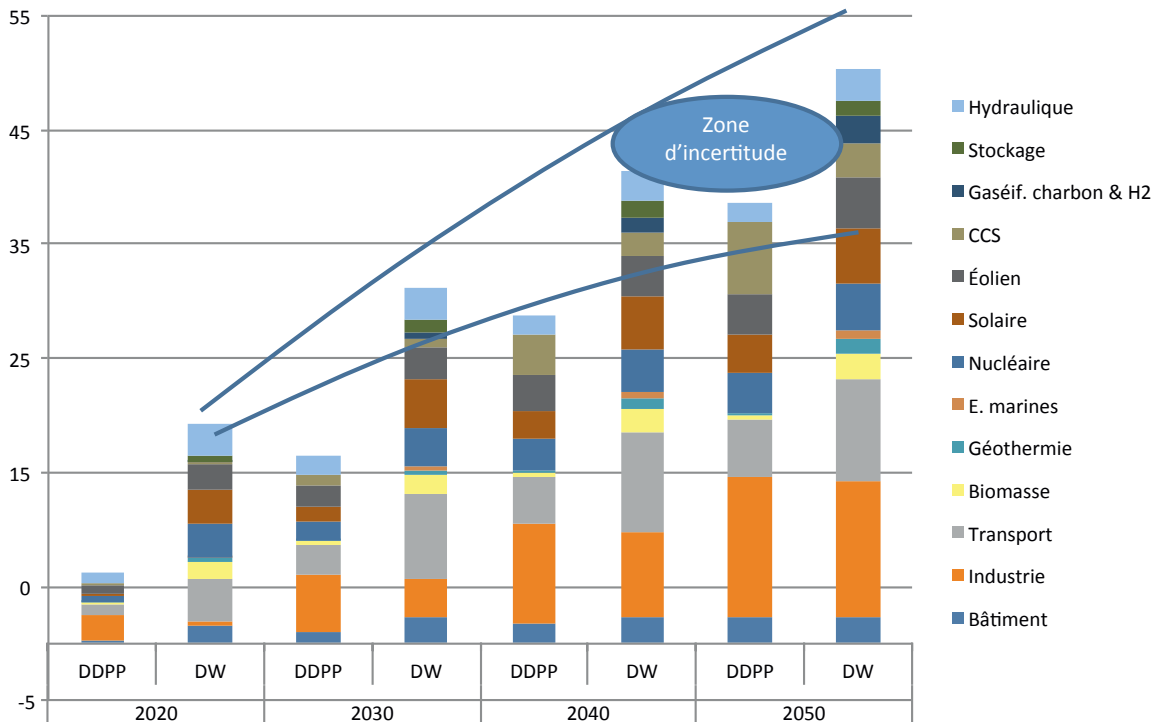


Figure 7 : Objectifs (DDPP) versus potentiels (ANCRE – GP) de réduction d'émissions

Source : DDPP & ANCRE

DW	DW	DW/DDPP	DDPP
Technologies	Abatement 2050	Abatement 2050	Abatement 2050
Biomass (elec, biofuel, heat)	4%	5%	1%
Hydro energy	5%	7%	4%
Geothermal (elec & heat)	3%	3%	1%
Marine	1%	2%	n.a
Nuclear (elec & heat)	8%	10%	8%
Solar (elec, thermal)	10%	12%	9%
Wind	9%	11%	9%
Building (mainly isolation)	5%	6%	6%
Industry	24%	30%	31%
Transport (vehicle)	17%	22%	12%
CCS (power units & industries)	5%	6%	15%
Power to Gas and H2	6%	8%	n.a
Storage	3%	3%	n.a
Network/Grids	n.a	n.a	n.a
			4%

Tableau 2 : Impact de la structure des leviers/wedges dans DW et DDPP

développement technologique dans le secteur des transports, les deux études convergent sur l'importance des réductions à attendre dans l'industrie, et inversement, sur la relative faiblesse des potentiels disponibles dans le secteur du bâtiment. Selon l'ANCRE, les nouvelles

technologies d'efficacité énergétique et de décarbonation dans l'industrie et les transports devraient contribuer respectivement à 24 % et 19 % des réductions globales en 2050, alors que la contribution du secteur du bâtiment se situerait autour de 5 %.

3. Politiques publiques pour le déploiement des technologies bas-carbone

La décarbonation des systèmes énergétiques nécessite une profonde transformation des systèmes techniques, des styles de vie et des habitudes de consommation, ainsi que des institutions de régulation et des modes d'organisation des industries de l'énergie. Il s'agit d'encourager l'émergence de ces nouveaux systèmes sociotechniques à l'échelle locale, nationale et internationale. Les politiques de R&D peuvent largement y contribuer mais l'étude du changement technique montre que la transformation de ces systèmes renvoie également à d'autres dimensions (voir par exemple Geels et al., 2007). La transition vers des systèmes énergétiques décarbonés suppose ainsi la généralisation de nouvelles solutions technologiques dont le déploiement dépendra dans une large

mesure de l'environnement économique et social observable. La cohérence entre ces trois niveaux conditionne le succès d'une évolution rapide de notre système énergétique vers des systèmes en grande partie décarbonés.

3.1 Favoriser les approches systémiques de la décarbonation

La décarbonation ne pourra s'opérer sans un effort considérable de réduction et/ou de transformation des consommations d'énergie : c'est ce qu'indique l'importance des *wedges* « efficacité énergétique » et « substitution par des vecteurs décarbonés » dans les trois secteurs de consommation finale (bâtiment, industrie et transports) pour l'étude DDPP (Voir 2.1 et 2.2). La réalisation de ces potentiels suppose d'accorder une grande attention aux habitudes de consommation, à la réglementation, aux dispositifs d'incitation, aux signaux économiques, de façon à permettre la diffusion d'options et de comportements « bas-carbone ».

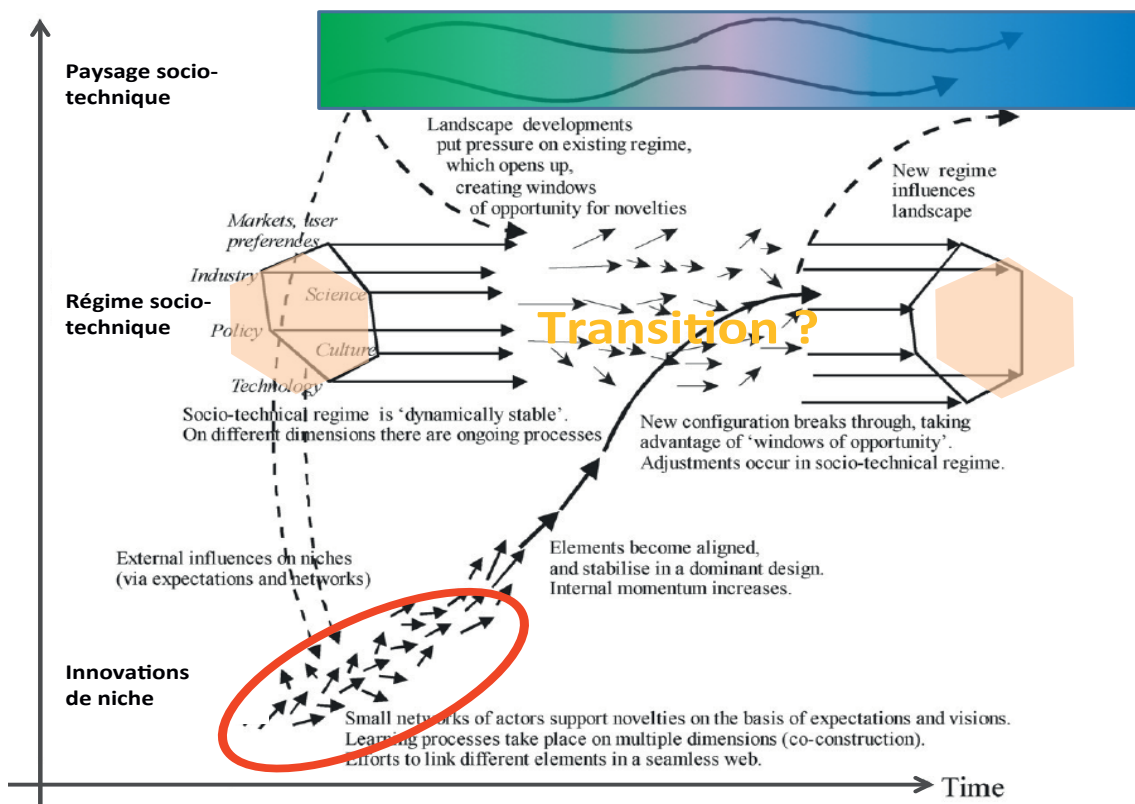


Figure 8 – Les perspectives multi-échelles de la transition (d'après Geels)

D'autre part, la décarbonation s'appuie sur l'intégration croissante de sources d'énergie renouvelable dans le système électrique, et en particulier de sources intermittentes. Ceci nécessitera des évolutions importantes des systèmes électriques pour garantir leur stabilité et leur résilience. Des évolutions qui pourraient impliquer tout à la fois de renforcer ou de compléter les interconnexions existantes (« supergrids ») et de développer des solutions plus locales basées sur des réseaux plus intelligents, et éventuellement des dispositifs de stockage, pour ajuster l'offre et la demande d'électricité.

Le caractère systémique des problèmes posés par l'intégration des énergies renouvelables variables, de même que la complexité des politiques visant à réduire ou faire évoluer la demande d'énergie nécessitent d'engager des recherches sur les systèmes socio-techniques en complément des approches purement technologiques.

3.2 Un effort global de R&D insuffisant

Le budget total de la R&D publique consacré à l'énergie a varié considérablement – entre 10 et 20 milliards de dollars par an en monnaie constante (Figure 9) – au cours des

quatre dernières décennies pour se stabiliser aujourd'hui autour de 15 milliards de dollars (AIE, 2015). Sa structure a également évolué vers une répartition plus homogène dans laquelle la place du nucléaire devient comparable à celle des autres formes d'énergie (y compris l'efficacité énergétique).

Les variations du budget global semblent suivre de façon assez étroite les fluctuations des prix internationaux du pétrole (Figure 9) mais pas la montée des préoccupations à l'égard de l'environnement global. On peut dès lors se demander si les montants actuels des budgets de R&D publique sont et seront suffisants pour répondre à la menace majeure que constitue le changement climatique (Nemet et al., 2007).

3.3 Approches systémiques et recherches transdisciplinaires

Les politiques d'innovation s'appuient classiquement sur différents types d'instruments en fonction de l'évolution de la maturité des technologies : depuis la recherche amont jusqu'à l'ouverture des marchés en passant par la R&D et les programmes de recherche industrielle. S'agissant des technologies bas-carbone, il convient de cibler les potentiels de décarbonation les plus prometteurs mais dans le même

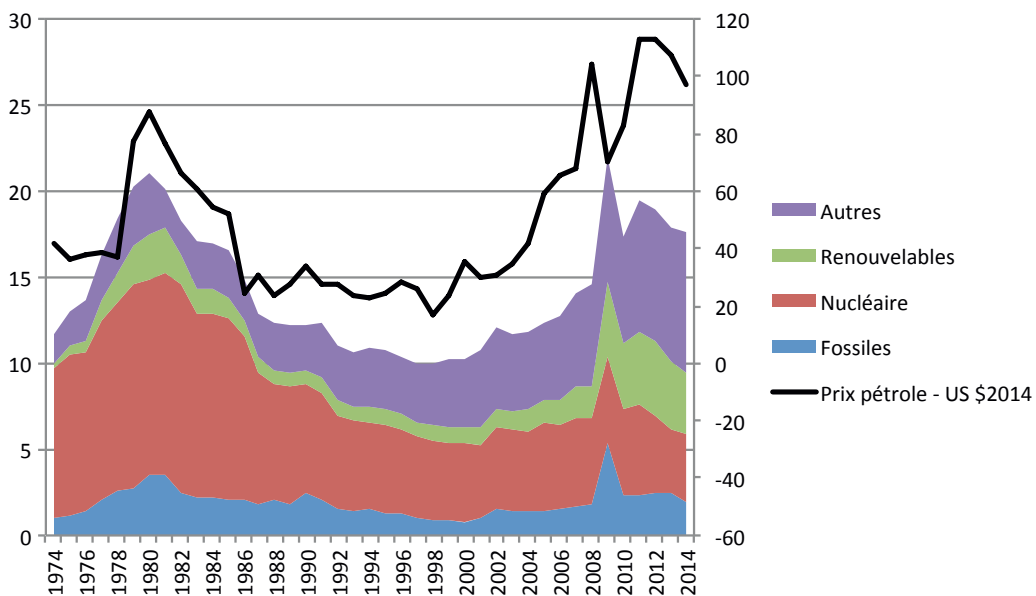


Figure 9 –R&D publique et prix du pétrole - Source: IEA*
 * Online RD&D budget database

temps de conserver une approche systémique susceptible de faciliter la transition vers un nouveau système sociotechnique. Les politiques d'innovation doivent donc combiner les recherches ciblées sur des objets techniques bien identifiés, les recherches transversales visant des problématiques plus systémiques et des recherches transdisciplinaires avec une forte composante de sciences humaines et sociales (SHS). Parmi les thématiques qui nous semblent nécessiter des efforts de recherche significatifs, on peut citer :

- Les technologies de demande pour le bâtiment, les transports et l'industrie, avec un centrage sur l'efficacité énergétique et la diffusion des vecteurs énergétiques bas-carbone et les technologies d'offre zéro – ou bas-carbone comme le solaire, le nucléaire, les bioénergies et dans une moindre mesure, compte tenu de leur maturité ou de leur potentiel plus limité, l'éolien, la géothermie et les énergies marines.
- La dimension sociétale de la transition pour améliorer la connaissance des comportements collectifs et individuels, d'un point de vue sociologique ou économique ; l'exploration de nouveaux dispositifs de gouvernance multi-échelles ou multi-polaires ; l'analyse de la performance de différentes combinaisons d'instruments d'incitation et de réglementation.
- Les solutions transversales qui permettent le développement de réseaux énergétiques hybrides multi-énergies et plus généralement tout type de solution facilitant l'ajustement instantané de l'offre et de la demande dans des systèmes énergétiques intégrant une forte proportion d'énergies renouvelables variables.
- Le développement de la bio-économie - bio-ressources pour l'énergie et les matériaux-par l'intermédiaire de *process* innovants et des possibilités d'utilisation ou de recyclage du CO₂.
- Le maintien d'un effort dans la recherche fondamentale de façon à identifier de potentielles innovations de rupture dans des secteurs tels que le transport et le stockage d'énergie, les nanotechnologies,

les technologies de mesure, le traitement et la gestion des *big data*.

La plupart de ces questions sont susceptibles d'intéresser de nombreux pays, mais leur importance relative varie selon le niveau de développement du pays, selon le niveau de ses émissions et au final de ses caractéristiques propres. Cela pourrait inciter certains d'entre eux à se regrouper au sein de *clubs* sur la base de problématiques technologiques communes et dans le but de combiner leurs efforts pour accélérer la diffusion des nouvelles technologies bas-carbone.

3.4 Coopération internationale et transferts de technologie

Les politiques de R&D destinées à permettre une décarbonation profonde des systèmes énergétiques ont également une composante nationale. En effet, les 6 technologies de demande et les 11 technologies d'offre identifiées dans l'étude DW devront être mises en œuvre, quoi que avec une intensité variable, dans tous les pays ou régions considérés. La politique de décarbonation qui vise à la généralisation des technologies bas-carbone doit donc comporter un volet important de coopération internationale en matière de R&D. Les fonds internationaux destinés à la mitigation et à l'adaptation au changement climatique pourraient aider à renforcer cette coopération. Rappelons qu'en 2020, l'ordre de grandeur de ces transferts est estimé à :

- 10 milliards \$/an pour les transferts publics du nord vers le sud dans le cadre du Fond d'Adaptation de l'UNFCCC;
- 100 milliards \$/an pour les transferts publics et privés des pays du nord vers les pays du sud.
- 1 000 milliards \$/an comme montant de l'investissement dans les technologies bas-carbone.

L'extension de la coopération dans le domaine de la R&D énergie ne signifie pas pour autant le recul de la compétition entre les industriels pour le développement de nouveaux produits ou les ventes de licences. Mais, la coopération internationale doit s'attacher à faciliter la mise en œuvre de partenariats mutuellement

profitables dans un contexte de marchés rapidement croissants. Ceci pourrait conduire à reconsidérer la question de la propriété intellectuelle sur les nouvelles technologies bas-carbone ; il est en effet essentiel d'imposer une gestion internationale plus collaborative de ces droits. Ce sujet constitue indéniablement un enjeu majeur dans la perspective d'une diffusion rapide et massive de ces technologies. L'enjeu est particulièrement important pour les pays les moins avancés pour lesquels il pourrait être difficile de concilier les priorités de développement économique et la diffusion des technologies bas-carbone, sans un accord international facilitant l'accès à ces nouvelles technologies.

4. La place des nouvelles technologies dans la décarbonation profonde

L'objectif de l'étude DW était de mieux évaluer les potentiels de réduction d'émissions de GES associés au développement de solutions à fort contenu technologique en comparant les résultats de deux études complémentaires. La première est basée sur les scénarios de transition vers des systèmes énergétiques bas-carbone élaborés dans le cadre du projet DDPP par les 16 pays les plus gros émetteurs de GES. La seconde repose sur une évaluation des potentiels de développement des principales technologies bas-carbone réalisée par les experts des groupes programmatiques de l'ANCRE.

Le rapprochement de ces deux études permet de tirer plusieurs conclusions :

- Le développement technologique (ANCRE a identifié 108 technologies clés) permettrait une réduction des émissions de l'ordre de 40 milliards de tonnes en 2050 par rapport à la situation de référence.
- À court terme, le potentiel associé à ces technologies excède les besoins de réduction d'émissions tels qu'ils apparaissent dans les trajectoires bas carbone de DDPP, à condition que les comportements et les politiques d'incitation facilitent leur déploiement. À plus long terme, les besoins d'abattement et les potentiels technologiques vont

continuer à croître ; mais les potentiels ne progresseront pas aussi vite que les besoins et vers 2050 les marges de manœuvre se seront fortement réduites ne laissant que peu de place à l'incertitude. Si le scénario 2°C apparaît techniquement réalisable, il nécessitera un effort important sur la R&D de façon à réduire au maximum cette incertitude sur le développement des technologies.

- Les principaux freins au développement technologique sont d'ordre économique et financier (les nouvelles technologies de l'énergie sont souvent intensives en capital et posent des problèmes classiques de compétitivité et d'accès au financement) ; l'environnement réglementaire qui pourrait favoriser l'émergence des nouvelles technologies peut, à l'inverse, limiter leur déploiement, en cas d'instabilité ; enfin, les performances, encore insuffisantes, des technologies elles-mêmes sont susceptibles de bloquer leur diffusion, si d'autres technologies plus matures sont en concurrence et les efforts de R&D qui leur sont consacrés, insuffisants.
- Parmi les technologies d'offre (production d'électricité), le solaire, l'éolien et le nucléaire représentent les potentiels les plus importants, ainsi que, dans une moindre mesure, la biomasse et l'hydraulique. D'autres, telles que la géothermie ou les énergies marines n'auront peut-être pas encore atteint leur plein potentiel en 2050. La contribution du CCS est, elle, plus controversée ; les experts de l'ANCRE la jugent de faible importance en 2050, alors qu'elle joue un rôle important dans les trajectoires bas carbone pour DDPP.
- En ce qui concerne la demande finale, les deux secteurs qui concentrent les principaux enjeux sont l'industrie et les transports. Pour l'ANCRE, la contribution attendue du secteur du bâtiment à la réduction des émissions est assez faible, en grande partie en raison de la méthode retenue (entrée par les nouvelles technologies). Le bâtiment est toutefois aussi en retrait dans DDPP, en particulier dans les pays en développement où l'augmentation des besoins à satisfaire dépasse les gains d'efficacité.

Pour contourner les principaux blocages identifiés et mobiliser les potentiels des nouvelles technologies, différentes stratégies s'imposent. Nous avons choisi ici de retenir certaines propositions qui associent renforcement des efforts de recherche, pluridisciplinarité et coopération internationale :

- Accroître sensiblement les efforts de R&D à l'échelle globale et pour l'ensemble des technologies bas carbone (l'OCDE et l'AIE considèrent qu'une multiplication des budgets de R&D par un facteur 7 serait nécessaire) ; cette croissance apparaît nécessaire pour limiter l'incertitude sur les progrès attendus de certaines technologies et en raison des faibles marges de manœuvre existant à 2050.
- Les familles de technologies les plus prometteuses doivent toutefois concentrer les principaux efforts de R&D ; il s'agit tout à la fois de maintenir une large diversité d'options mais également de s'assurer que les technologies clés progressent en phase avec les besoins de réduction qu'impose la trajectoire 2°C.
- Les besoins de R&D ne concernent pas la seule dimension technologique, les sciences humaines et sociales doivent être intégrées dès le début du processus d'innovation ; elles peuvent aider à élaborer des solutions répondant aux attentes des territoires et de la société civile, tout en faisant évoluer les réglementations et modes de gouvernance pour une meilleure intégration des nouvelles technologies. Plus généralement, les sciences humaines et sociales, l'économie, les sciences politiques peuvent contribuer à mieux identifier les conditions d'un large déploiement des nouvelles technologies dans l'ensemble des régions du monde.
- Le rôle des marchés dans le déploiement des nouvelles technologies ne doit pas être négligé en complément d'une approche centrée sur le développement technologique (« supply push ») ; des instruments de soutien à la production d'électricité renouvelable comme les prix garantis, les primes ou les enchères ont, par exemple, largement fait preuve de leur efficacité, à la fois dans les pays industrialisés et de plus en plus, dans

les pays émergents. D'autres initiatives telles que le regroupement de certains pays ayant des problématiques et des ambitions communes au sein de *clubs* pourraient également créer des synergies et des effets de levier très favorables au déploiement des nouvelles technologies bas-carbone.

- Le déploiement des nouvelles technologies dans les pays en développement est aussi indispensable à la réalisation d'une trajectoire globale d'émissions compatible avec un scénario 2°C. Pour cela, la coopération technologique et les transferts de technologie, et notamment une gestion internationale plus collaborative des droits de propriété, constituent des enjeux majeurs pour permettre une large diffusion des nouvelles technologies.

Les résultats de ces deux études montrent l'importance d'un engagement massif et rapide en faveur du développement technologique, qui doit être en partie coordonné à l'échelle internationale. Cet engagement doit non seulement soutenir l'innovation mais aussi induire des changements de comportements, des conditions économiques, des modes de régulation qui pourront faciliter le déploiement à une large échelle des technologies bas-carbone. ■

Bibliographie

- AIE, Energy Technology Perspectives (ETP) : Mobilizing innovation to Accelerate Climate Action mai 2015.
- ANCRE, (2015), Decarbonization Wedges – Report.
- Ang, B. W., F. L. Liu and E. P. Chew (2003). "Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis." *Energy Policy* 31(14): pp.1561-1566.
- Deep Decarbonization Pathways Project (2015), Pathways to deep decarbonization – 2015 report, SDSN – IDDRI.
- Geels Frank. W., Schot Johan., (2007), Typology of sociotechnical transition pathways, *Research Policy* (36), pp. 319-417.
- Kaya, Y. (1989). Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios. IPCC Energy and Industry Subgroup - Response Strategies Working Group. (mimeo). Paris.
- Nemet Gregory F., Kammen Daniel M., (2007), U.S. energy research and development: Declining investment, increasing need, and the feasibility of expansion", *Energy Policy*, 35 (1).
- Pacala, S., Socolow, R., (2004). Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305, pp. 968-972.