



La neutralité carbone, défis d'une ambition planétaire

Clarifications conceptuelles, panorama des initiatives et recommandations pour les stratégies nationales

Aleksandar Rankovic, Michel Colombier, Andreas Rüdinger, Marie-Hélène Schwoob, Oliver Sartor, Sébastien Treyer, Lola Vallejo & Henri Waisman (Iddri)

NEUTRALITÉ CARBONE ET ACCORD DE PARIS

L'article 4.1 de l'Accord de Paris marque la première inscription de l'objectif de neutralité en gaz à effet de serre (GES), ou neutralité carbone, dans un accord international. Un nombre réduit mais croissant de pays a déjà intégré ce concept dans leurs stratégies de développement, avec des approches très différentes. Cette diversité reflète en partie les importants défis méthodologiques, technologiques et politiques associés à la définition de la neutralité carbone et à sa concrétisation, notamment en tant que guide pour l'élaboration ascendante des contributions déterminées au niveau national (CDN).

ACCROÎTRE EN PRIORITÉ LES EFFORTS DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS DE GES

Il est nécessaire d'agir de manière urgente pour atteindre les potentiels existants de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans tous les secteurs, en combinant des solutions technologiques et comportementales compatibles avec les objectifs de développement des pays, et ce afin de minimiser en particulier les émissions résiduelles après 2050 dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie.

PROTECTION DES PUIXS DE CARBONE ET INVESTISSEMENTS TECHNOLOGIQUES POUR LES ÉMISSIONS RÉSIDUELLES

Les approches de protection des puits de carbone naturels doivent traiter les principaux facteurs sectoriels liés à la dégradation et la destruction des écosystèmes terrestres et marins et favoriser les changements de pratiques sectorielles. Il est en outre nécessaire d'investir dans la recherche et développement pour les technologies de capture et de stockage du carbone afin de traiter les émissions résiduelles, car les puits existants et les options d'innovation actuelles ne sont respectivement pas une solution permanente ou ne sont pas prêtes à être déployées.

UN RÉFÉRENTIEL COMMUN POUR UNE ACTION CLIMATIQUE AMBITIEUSE

La neutralité carbone peut constituer un langage et un horizon temporel communs, pour les différents acteurs engagés dans la lutte contre le changement climatique. Chaque acteur peut définir sa place dans un monde neutre en carbone, en fonction de ses contraintes, dotations, potentiels, et non seulement (ou nécessairement) viser la neutralité au niveau de ses propres activités ou territoire. La résultante de ces différentes positions peut permettre de renouveler les discussions sur les options de réductions d'émissions domestiques, celles liées au commerce international, sur la manière de mobiliser les puits de carbone et les technologies à émissions négatives.

Copyright © 2018 Iddri

En tant que fondation reconnue d'utilité publique, l'Iddri encourage, sous réserve de citation (référence bibliographique et/ou URL correspondante), la reproduction et la communication de ses contenus, à des fins personnelles, dans le cadre de recherches ou à des fins pédagogiques. Toute utilisation commerciale (en version imprimée ou électronique) est toutefois interdite.

Sauf mention contraire, les opinions, interprétations et conclusions exprimées sont celles de leurs auteurs, et n'engagent pas nécessairement l'Iddri en tant qu'institution ni les individus ou les organisations consultés dans le cadre de cette étude.

Citation : Rankovic, A. *et al.*, (2018). La neutralité carbone, défis d'une ambition planétaire - Clarifications conceptuelles, panorama des initiatives et recommandations pour les stratégies nationales. Iddri, *Study N°10/18*, Paris, France, 44 p.



Ce travail a bénéficié de financements de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Il a également bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-10-LABX-01.



Pour toute question sur cette publication, merci de contacter :

Aleksandar Rankovic –

aleksandar.rankovic@iddri.org

Michel Colombier – michel.colombier@iddri.org

Lola Vallejo – lola.vallejo@iddri.org

ISSN 2258-7535

La neutralité carbone, défis d'une ambition planétaire

Clarifications conceptuelles, panorama
des initiatives et recommandations
pour les stratégies nationales

Aleksandar Rankovic, Michel Colombier, Andreas
Rüdinger, Marie-Hélène Schwoob, Oliver Sartor,
Sébastien Treyer, Lola Vallejo & Henri Waisman (Iddri)

INTRODUCTION	5
1. LA NEUTRALITÉ CARBONE ET LE RENOUVELLEMENT DES INTERACTIONS ENTRE SCIENCES ET POLITIQUES CLIMATIQUES	6
1.1. Le scénario RCP2.6 du Giec vu sous l'angle de la neutralité carbone	7
1.2. Forêts, sols et océans : incertitudes écologiques et politiques sur le futur des puits de carbone mondiaux	9
1.3. Technologies à émissions négatives : une approche par la précaution	12
1.4. Le poids des différents GES	15
1.5. Faire atterrir l'objectif de neutralité	16
2. INITIATIVES NATIONALES AUTOUR DE LA NEUTRALITÉ CARBONE : UN PANORAMA COMMENTÉ	17
2.1. Études de cas nationales	18
2.2. Enseignements et questionnements	24
3. STRATÉGIES NATIONALES CADRÉES PAR L'OBJECTIF DE NEUTRALITÉ CARBONE – POINTS D'ATTENTION ET RECOMMANDATIONS	26
3.1. La neutralité, un attracteur politique	26
3.2. Redéfinir le cadre d'engagement : objectifs politiques, périmètres, comptabilité	27
3.3. Considérer les solutions techniques et les évolutions sociétales	33
3.4. Réinventer les processus d'élaboration et de mise en œuvre des scénarios	36
CONCLUSION – LA NEUTRALITÉ CARBONE, UN LANGAGE COMMUN À TRAVERS LES ÉCHELLES	39
RÉFÉRENCES	40

INTRODUCTION

Pour atteindre l'ambition de l'Accord de Paris, rappelée dans son article 2, de contenir « l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels », le texte de l'accord décline plusieurs modalités de mise en œuvre. En particulier, l'article 4.1 introduit de manière explicite un objectif de neutralité en gaz à effet de serre, visant à « parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle ». L'accord introduit également un ensemble de dispositifs visant à atteindre cet objectif de neutralité, notamment la soumission de contributions nationales revues à la hausse tous les cinq ans à la suite d'un bilan collectif, elles-mêmes informées par l'élaboration volontaire de « stratégies à long terme de développement à faible émission de gaz à effet de serre » (article 4.19).

L'ambition de neutralité en gaz à effet de serre (GES), qui tend à être désignée par le terme (pas tout à fait équivalent) de « neutralité carbone », fait l'objet d'une attention scientifique et politique croissante. Plusieurs États, dont la France, ont d'ores et déjà fait de la neutralité carbone un objectif de long terme pour leurs politiques climatiques. Des gouvernements infranationaux, comme des villes ou des régions, s'emparent également de cet objectif pour l'appliquer à leur territoire. On retrouve également la neutralité carbone dans les campagnes des organisations non gouvernementales (ONG), dans les initiatives du secteur privé, ou encore dans les stratégies de développement d'un nombre croissant de campus universitaires. Au niveau international, lors de la

22^e Conférence des Parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP22), la France a explicitement annoncé, par le biais du Président François Hollande, qu'elle souhaitait prendre la tête d'une « coalition neutralité carbone » à l'horizon 2050 – l'objectif de neutralité carbone à 2050 ayant été depuis introduit dans le Plan climat porté par le ministère de la Transition écologique et solidaire. Via l'impulsion de la France et d'autres États, ainsi que des autres acteurs se positionnant sur le sujet, la neutralité carbone est vraisemblablement amenée à occuper une place importante et croissante des réflexions et débats sur l'action climatique.

Néanmoins, derrière une apparence relativement intuitive, l'ambition de neutralité carbone pose en fait de nombreux défis, tant sur le plan de la conceptualisation que de la mise en œuvre. Et ce, sur des paramètres fondamentaux, comme le périmètre des émissions concernées, ou les modalités de retrait du CO₂ de l'atmosphère, par exemple. Par ailleurs, il n'existe pas encore d'analyse systématique des différentes actions et annonces portant sur la neutralité carbone, et il est donc difficile de tirer des leçons de ces pratiques naissantes et d'en discuter les implications pour la mise en œuvre de l'Accord de Paris.

Cette étude se propose, en trois sections, de contribuer au débat collectif sur ce sujet et de proposer des recommandations pour les stratégies nationales cadrées par l'objectif de neutralité carbone.

- (i) Dans la première section, nous revenons sur la définition de la neutralité carbone et sur ce que la recherche et l'expertise proposent comme leviers politiques et techniques pour atteindre la neutralité, et sous quelles modalités.
- (ii) Dans la deuxième section, nous proposons un panorama commenté des annonces les plus instructives que les gouvernements ont faites sur la neutralité carbone.

- (iii) Dans la troisième section, des points d'attention et des recommandations sont identifiés pour la conception de stratégies nationales cadrées par l'objectif de neutralité carbone.

1. LA NEUTRALITÉ CARBONE ET LE RENOUVELLEMENT DES INTERACTIONS ENTRE SCIENCES ET POLITIQUES CLIMATIQUES

S'interroger sur les modalités de mise en œuvre de l'Accord de Paris, et sur la manière d'atteindre la neutralité carbone, impose de s'intéresser à la manière dont les sciences, l'innovation et l'expertise climatiques cadrent les problèmes et proposent des solutions. En effet, à l'instar des autres sujets environnementaux, mais probablement de façon encore plus prononcée ici, les relations complexes entre sciences et décisions ont toujours été consubstantielles à la mise (et maintien) à l'agenda et la prise en charge politiques de la question climatique.

Dans les années 1980, alors que les initiatives nationales et internationales se multipliaient, tant pour structurer l'expertise sur le changement climatique que pour préparer un traité international sur le sujet, la nature nouvelle du problème climatique a abouti à une nouvelle manière de penser l'expertise internationale sur un sujet d'environnement. Tandis que sur des sujets « historiques », ayant à l'époque fait l'objet de succès diplomatiques récents (comme la couche d'ozone ou la pollution atmosphérique transfrontalière, pour ne citer que ces exemples), le problème environnemental était lié à des industries circonscrites, pour lesquelles des substituts techniques relativement abordables étaient disponibles, il est très vite apparu que résoudre le problème climatique demanderait de réformer des pans entiers de l'économie (si ce n'est des économies entières) et nécessiterait donc un fort soutien des décideurs politiques à tous niveaux – et engagerait fortement leur responsabilité.

Comme le décrit Agrawala (1998a, 1998b) dans sa description du contexte historique de la création du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), les acteurs gouvernementaux et onusiens ont vite pris la mesure du fait que sur un sujet de cette importance, les acteurs politiques ne pouvaient plus se contenter de comprendre ce qui était décrit par les scientifiques, mais que les questions de qui produisait ces constats, et comment – et notamment avec quelle capacité de réponse aux demandes provenant des négociations –, étaient devenues tout aussi cruciales. Le caractère intergouvernemental du Giec, créé en 1988, fut une

innovation majeure. Le fait que les gouvernements aient autorisé dans le choix des sujets qui feront l'objet d'une évaluation des connaissances, dans le choix des experts, et qu'ils soient impliqués dans la révision des versions intermédiaires et qu'ils négocient ligne à ligne les résumés pour décideurs, est essentiel pour assurer aux travaux du Giec une légitimité politique au Nord comme au Sud. L'implication, dès l'origine, de noms majeurs des sciences climatiques, lui assure pour sa part une forte légitimité scientifique. Tant par son importance scientifique que politique, le Giec a joué et joue toujours un rôle majeur sur la scène climatique internationale, ne serait-ce que par son autorité symbolique dans le cadrage du problème et les propositions de solutions au changement climatique.

Mais cette imbrication institutionnelle inédite entre sciences et politiques vient avec son lot de contraintes et de surprises. Le périmètre important des connaissances à évaluer pour chaque rapport, ou encore l'usage extensif de la révision par les pairs et les gouvernements, par exemple, alourdissent considérablement la production des rapports. Les déséquilibres disciplinaires, en particulier concernant l'implication des sciences humaines et sociales, et la difficulté à modifier les cadrages de certaines problématiques, notamment au sujet des réponses politiques possibles au problème climatique, sont une autre source de frustrations qui s'expriment régulièrement dans les colonnes des plus grandes revues scientifiques (voir par exemple Victor, 2015). Malgré ces inerties, cette imbrication étroite des sciences et politiques climatiques, illustrée par le Giec, produit régulièrement des innovations dans la dynamique des discussions internationales sur le climat. Elle conduit au développement d'objets hybrides dont il est parfois difficile de saisir tout à fait l'origine et les contours. Il n'est ainsi pas trivial de retracer l'origine des objectifs de température à long terme (les 2°C et les 1,5°C), qui apparaissent dans les négociations en se revendiquant venir directement des recommandations scientifiques (voire du Giec lui-même), tandis que les scientifiques s'en défendent et certains y voient même, au contraire, une demande apparue dans le processus politique, pas forcément réaliste et qui vient en tout cas ajouter une nouvelle contrainte à leurs travaux (Cointe *et al.*, 2011 ; Guillemot, 2017). D'autres objets, comme des innovations technologiques, à l'instar du BECCS (Bio-energy with carbon capture and storage), apparaissent dans des travaux de modélisateurs et, malgré un très faible niveau de maturité et un déploiement quasi nul, se retrouvent envisagés dans des stratégies nationales comme une des solutions technologiques au changement climatique dans les décennies à venir (Andersen & Peters, 2016 ; Guillemot, 2017).

La neutralité carbone peut être considérée comme l'un de ces nouveaux objets hybrides apparus dans l'Accord de Paris. Son apparente simplicité (à partir de la seconde moitié du xxi^e siècle, ne pas émettre globalement plus de gaz à effet de serre que ce que le système Terre et les innovations techniques sont capables d'absorber) est probablement ce qui lui assure d'être déjà mobilisée par une grande diversité d'acteurs étatiques et non étatiques. Néanmoins, la neutralité carbone impose un cadrage radicalement nouveau à l'action climatique, dont les modalités d'atteinte restent en grande partie à inventer, en pratique mais aussi conceptuellement et méthodologiquement. Si l'objectif de neutralité carbone globale s'appuie sur le diagnostic de la communauté scientifique, il ne constitue pourtant pas en lui-même une réponse définitive au défi que le changement climatique pose à l'humanité, et aux objectifs qu'elle s'est donnés. Il constitue un outil pour réfléchir sur, et agir pour, une inflexion majeure des trajectoires d'émissions – et la possibilité d'un retrait actif, en complément, des gaz à effet de serre de l'atmosphère.

Objectif très ambitieux, la neutralité carbone dispose ainsi d'un caractère heuristique certain. En mettant explicitement en regard les émissions anthropiques de GES et les capacités naturelles et artificielles à retirer les GES de l'atmosphère, l'objectif de neutralité oblige à présent d'évaluer les trajectoires de réduction d'émissions à l'étalon exigeant du système Terre et des capacités réelles d'innovation (et de déploiement !) technologique dans les décennies à venir. Du point de vue des relations entre sciences et décisions, ceci amène ainsi respectivement à réinterroger la manière dont les scénarios d'émissions sont construits (quelles hypothèses sous-jacentes sur les réductions d'émissions possibles, comment les émissions résiduelles sont-elles justifiées, quels sont les secteurs concernés ? etc.) et l'état des connaissances sur, à la fois, les puits biogéniques de carbone et les technologies disponibles pour retirer les gaz à effet de serre de l'atmosphère (technologies dites à « émissions négatives »).

1.1. Le scénario RCP2.6 du Giec vu sous l'angle de la neutralité carbone

Les modèles et scénarios occupent une place centrale dans les discussions climatiques. Outils puissants, qui se sont complexifiés au fil du temps, ils permettent de mieux comprendre et hiérarchiser les facteurs déterminant l'état du système climatique et d'explorer les différents futurs possibles du climat dans ses diverses composantes,

en fonction de différentes hypothèses physiques, socioéconomiques et politiques. Malgré l'importance de ces outils, et l'influence des résultats qu'ils produisent sur les débats politiques, ils restent relativement peu compris au-delà de la communauté de spécialistes, très structurée, qui les produisent. Les autres communautés scientifiques, et les sphères de la décision, ne perçoivent généralement pas les hypothèses sous-jacentes à certaines conclusions des scénarios d'atténuation du changement climatique, et ont du mal à se les approprier de manière critique et à les adapter à leur propre action (Anderson & Peters, 2016).

Dans le cadre de son cinquième cycle d'évaluation, le Giec a mis en place une nouvelle approche pour la production de scénarios, basée sur quatre trajectoires de concentrations de GES dans l'atmosphère, les Representative Concentration Pathways (RCP). Les RCP sont nommées en fonction du degré de forçage radiatif supplémentaire (différence entre la quantité d'énergie solaire reçue par le système climatique et la quantité qui en ressort vers l'espace) correspondant à la concentration en GES à 2100. Les quatre RCP sont ainsi nommées RCP2.6, RCP4.5, RCP6 et RCP8.5 ; RCP2.6 correspondant ainsi à un forçage radiatif de $+2,6 \text{ W/m}^2$ en 2100. Derrière chaque RCP, un ensemble complexe de modèles et scénarios sert à simuler les évolutions socioéconomiques et de l'usage des terres, et à projeter leurs conséquences sur l'état futur du système climatique (voir van Vuuren *et al.*, 2011a pour un aperçu d'ensemble des RCP). Ces ensembles complexes sont appelés des Integrated Assessment Models (IAMs). On compte un IAM distinct derrière chaque RCP, qui fournit les hypothèses et paramétrisations initiales correspondant effectivement à la trajectoire de concentrations considérée. Les RCP peuvent ensuite être utilisés pour tester, par exemple, la sensibilité du système climatique à tel ou tel changement dans le système Terre (activités humaines comprises).

Parmi les RCP, le scénario RCP2.6 est le plus ambitieux dans ce qu'il implique en termes de réduction d'émissions de GES au cours du siècle, et il est celui avec lequel la limitation du réchauffement global à $+2^\circ\text{C}$ en 2100 est la plus probable. Le scénario RCP2.6 est aussi parfois appelé scénario peak and decline, car il se caractérise par un pic de concentration de GES avant la moitié du siècle, suivi d'un déclin progressif jusque 2100. Qu'y a-t-il derrière cette inflexion ?

Le scénario RCP2.6 est produit à l'aide de l'IAM IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment), développé par l'Agence néerlandaise d'évaluation environnementale (PBL) (van Vuuren *et al.*, 2011b). Le modèle se base notamment sur un portfolio d'options d'atténuation,

chacune avec un coût associé, et le modèle choisit les technologies les plus efficaces économiquement (cost-effective technologies) par rapport aux objectifs assignés. Dans le RCP2.6, les émissions de CO₂ par le secteur énergétique et l'industrie sont réduites de 100 % et vont jusqu'à atteindre un retrait de l'atmosphère de près de 1 GtC par an en 2100. Ceci est atteint par une forte amélioration de l'efficacité énergétique, la substitution du résidu d'énergies fossiles par l'usage d'énergies fossiles avec capture et stockage du carbone (CSC), le déploiement d'énergies renouvelables, l'énergie nucléaire et l'utilisation du BECCS qui conduit à des émissions négatives dans le secteur énergétique (van Vuuren *et al.*, 2011b). Par ailleurs, dans le RCP2.6, la plupart des émissions résiduelles sont liées aux autres GES que le CO₂, principalement d'origine agricole – CH₄ des ruminants et N₂O émis des sols. Les auteurs (*ibid.*) soulignent que le « potentiel d'abattement de ces gaz est limité » et qu'évaluer les marges de progrès pour les GES hors CO₂ (en particulier secteur agricole) est une question prioritaire. Enfin, les émissions liées au secteur des transports (incluant le transport international, aérien et maritime) restent relativement stables dans le RCP2.6. (*ibid.*, voir Figure 4).

Dans le RCP2.6, c'est principalement le BECCS qui aboutit à des émissions négatives du secteur énergétique en 2100. Conséquence de la diminution de la concentration atmosphérique en CO₂, le scénario prévoit une baisse progressive et importante de l'absorption de CO₂ par la biosphère continentale et les océans. En 2100, le scénario estime ainsi que le secteur énergétique représentera autant d'émissions négatives que les puits de carbone biogénique (*ibid.*, voir Figure 8).

Plusieurs commentaires sont nécessaires ici.

Tout d'abord, il faut souligner qu'il n'existe pas encore de scénarios construits spécifiquement pour l'objectif de neutralité carbone. Les scénarios sont essentiellement discutés par rapport à des objectifs de température de long terme à 2100, et la présentation des hypothèses et résultats ne correspond pas tout à fait aux questions qui sont plus propres à la neutralité carbone : à quelle échéance puis-je l'atteindre sur mon territoire ? Où dois-je mettre l'effort en priorité ? Que faire du résidu d'émissions ?

Ensuite, cette présentation sommaire du RCP2.6 illustre à quel point les scénarios peuvent vite devenir des boîtes noires dont les hypothèses échappent à la plupart des observateurs. Pour l'agriculture, le scénario tendanciel sur lequel se base RCP2.6 est une intensification de l'agriculture pour répondre à l'augmentation de la demande alimentaire globale, avec une augmentation de la consommation de viande. Pour le secteur énergétique, le

tendanciel considéré est une augmentation de la consommation dans les économies émergentes, avec domination des fossiles grâce à un coût faible. Pour les émissions liées au transport, seules les différentes technologies de carburants alternatifs et leurs coûts sont comparés. De manière générale, les IAMs se basent sur des hypothèses économiques et comportementales idéalisées et plutôt conservatrices (Waisman *et al.*, 2018) et ne tiennent que peu compte des dynamiques sociales possibles, voire en cours, qui sont susceptibles de modifier considérablement les modes de vie dans les prochaines décennies, et donc les comportements et les choix technologiques associés. Or, dans le cas de la neutralité carbone, et dans la philosophie générale de l'Accord de Paris, ce sont précisément ces transformations sociales qui sont au cœur de la question (et incluent, bien sûr, les choix technologiques).

Enfin, et c'est là un contraste frappant avec ce qui précède, les scénarios font un usage à grande échelle du BECCS, qui est une technologie encore à l'état de chimère. Dans le cinquième rapport d'évaluation du Giec, sur 400 scénarios ayant une probabilité d'au moins 50 % de maintenir le réchauffement à 2°C, 344 considèrent un déploiement à large échelle du BECCS (Anderson, 2015). Une des causes sous-jacentes tient aux hypothèses faites dans les IAMs, et notamment que le coût actualisé du BECCS dans les décennies futures est inférieur au coût de mesures d'atténuation ambitieuses prises aujourd'hui (Anderson & Peters, 2016). L'espace des solutions décrit par les IAMs tend ainsi à privilégier des options technologiques, même si encore somme toute virtuelles, à une réflexion sur des transformations plus profondes des modes de vie et des sociétés (comment se loger, comment se déplacer, comment s'alimenter). Pour accompagner la mise en œuvre de la neutralité carbone, il est nécessaire de compléter les IAMs, outils importants pour faire des projections globales, avec des exercices beaucoup plus incarnés dans ces besoins de transformations réelles. Nous y reviendrons dans la partie conclusive de cette section.

Il y a ainsi un fort besoin de recherche pour compléter les approches existantes afin d'explorer les modalités concrètes de réductions d'émissions pour atteindre la neutralité carbone. Dans les deux sections suivantes, nous nous tournons sur l'autre composante de l'article 4.1 de l'Accord de Paris, soit les capacités anthropiques de retrait de GES de l'atmosphère. Nous examinons premièrement, dans la section suivante, la question du carbone biogénique, en nous intéressant en particulier à trois grands compartiments de la biosphère faisant l'objet d'une attention marquée au niveau international : les forêts, les sols et les océans. Ceci nous permet de dégager des enseignements sur

les ordres de grandeur en jeu, mais également sur les marges de manœuvre disponibles pour effectivement protéger, voire accroître ces stocks de carbone. Ensuite, nous abordons les technologies à émissions négatives, pour offrir un panorama des solutions technologiques proposées dans la littérature et en soumettre une lecture quant à ce qui nous semble être leur potentiel respectif dans la quête de neutralité carbone. Nous observons enfin les équilibres proposés sur les réductions d'émissions gaz par gaz, les « non-dits » sous-jacents et les conséquences possibles sur la représentation que ces scénarios suggèrent de l'objectif de neutralité.

1.2. Forêts, sols et océans : incertitudes écologiques et politiques sur le futur des puits de carbone mondiaux

L'importance des stocks biogéniques de carbone, et l'importance de les protéger, voire de les renforcer, sont reconnues dès le texte initial de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (article 4). Dans le cadre de la neutralité carbone, cette question se trouve en partie renouvelée. Les stocks de carbone biogénique ne sont plus simplement des émissions à éviter, ni un accompagnement des efforts de réduction d'émissions par des mécanismes de compensation. La capacité de la biosphère à absorber le carbone anthropique devient une contrainte majeure de transformation des économies. Néanmoins, les pressions en cours sur les écosystèmes et l'érosion accélérée de la biodiversité, les impacts attendus du changement climatique sur ceux-ci, les incertitudes inhérentes à la complexité du cycle du carbone dans la biosphère, ou encore les difficultés à mettre en place des mécanismes internationaux efficaces pour protéger ces stocks, rendent leur futur, et notre capacité à agir dessus, incertains. En choisissant trois exemples d'initiatives visant à protéger des stocks de carbone biogéniques – les forêts et REDD+, les sols agricoles et le « 4 pour mille », les océans et le « carbone bleu » –, cette section vise à mettre en évidence les questions non résolues sur le futur écologique et politique des stocks biogéniques de carbone mondiaux.

1.2.1. Les forêts et l'exemple de REDD+

L'enjeu forestier est depuis longtemps présent dans les discussions climatiques. La déforestation constitue une source majeure d'émissions de GES au niveau mondial, et représente entre 10 et 12 % des émissions anthropiques de GES vers l'atmosphère (Baccini *et al.*, 2012). Smith *et al.*, (2016) estiment le potentiel global de retrait de carbone de l'atmosphère par le boisement et le reboisement

à entre 1,1 et 3,3 GtC/an. Dans son cinquième rapport d'évaluation, en fonction de différentes hypothèses sur le prix du carbone, le Giec a estimé ce potentiel à entre 0,4 et 3,8 GtC/an (IPCC, 2014). Par rapport aux transformations du transport, du secteur énergétique ou de l'industrie, agir sur la déforestation ou promouvoir le boisement est en général perçu comme une solution à bas coût, à portée de main, qui permettrait de régler relativement facilement déjà une partie du problème climatique. Ceci tend à sous-estimer les difficultés majeures, surtout dans un contexte d'expansion agricole continue, à réformer les politiques et pratiques ayant trait à l'usage des sols et qui déterminent, en ultime facteur, le devenir des forêts. Dans une large mesure, ce constat est applicable à l'ensemble des écosystèmes et des puits de carbone qu'ils constituent. L'exemple de REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation, le « + » renvoyant en général à Conservation and Sustainable Development), qui est probablement l'initiative la plus ambitieuse, au niveau international, pour préserver un type d'écosystème en vertu de sa fonction de puits de carbone, illustre bien les limites que peuvent rencontrer ces initiatives en pratique, et les besoins d'innover en la matière. Il est d'autant plus important d'y revenir que des logiques analogues se développent sur d'autres puits (sols agricoles, écosystèmes côtiers et océaniques) sans tirer des enseignements de l'expérience REDD+ et son efficacité.

Les discussions ayant mené au mécanisme REDD+ ont formellement débuté en 2005 à la CCNUCC, avec l'idée de faire bénéficier la lutte contre la déforestation dans les pays en développement de la visibilité politique et des ressources financières (espérées) provenant de l'arène climatique, et par la même occasion de traiter une cause majeure d'émissions anthropiques de GES. Comme le souligne Pirard (2012), « cette stratégie apparaissait alors si clairement gagnant-gagnant que peu doutaient de sa réussite ». Imaginé au départ comme un mécanisme de rémunération de la déforestation évitée au niveau national, le périmètre de REDD+ s'est étendu COP après COP, au fil des négociations et de la recherche de consensus, pour y inclure la dégradation évitée puis finalement la gestion durable et la conservation des forêts. Initiative volontaire au sein de la CCNUCC, REDD+ recouvre aujourd'hui près de 400 projets dans le monde, avec des modes de financements très divers (crédits carbone, aide publique au développement, ONG, secteur privé, etc.).

Quel bilan en tirer ? Avec près d'une décennie de recul, et par rapport à la problématique de la neutralité carbone, nous pouvons dégager trois enseignements.

1) Mettre en place un mécanisme international pour rémunérer la préservation d'un puits de carbone s'avère très difficile et peu efficace. Souvent présentée comme une « solution facile » et « peu chère » (Griscom *et al.*, 2017) pour lutter contre le changement climatique (un low-hanging fruit), la coordination internationale pour rémunérer la préservation des puits de carbone, qui semble simple en théorie, se heurte dans les faits à des limites probablement indépassables. L'évaluation de la performance des projets REDD+, en particulier, pose des problèmes majeurs. Entre autres exemples, on peut citer le fait que les organismes certificateurs des crédits carbone mesurent la performance des projets par rapport à un scénario de référence (« quel serait le niveau de déforestation sans projet REDD+, et de combien celui-ci va-t-il permettre de la réduire ? »), et il a été montré que ceci pouvait conduire à surestimer les taux attendus de déforestation pour surestimer la performance des projets et donc multiplier les crédits carbone associés, sans lien avec la performance réelle des projets et donc sans véritable effet transformationnel (Karsenty *et al.*, 2015 ; Seyller *et al.*, 2016). On peut aussi citer les coûts très importants de la « bureaucratie carbone » (dont les coûts de métrologie pour suivre les stocks de carbone), et autres limites pointées par la recherche (en sciences humaines et sociales) sur REDD+ et listées par Karsenty *et al.*, (2015).

2) Il est nécessaire de mettre l'accent sur les causes socioéconomiques de la dégradation des puits de carbone et encourager les transformations nécessaires à leur préservation. En lieu et place d'une approche trop « carbone centrée » de la performance, il pourrait être plus efficace de soutenir des réformes politiques visant explicitement les déterminants socioéconomiques de la déforestation, dont au premier chef l'expansion de l'agriculture intensive (Austin *et al.*, 2017). Comme le note Pirard (2012), « le problème ne se situe pas fondamentalement dans le secteur forestier, mais bien dans ceux de l'agriculture et du foncier » ; « [n]e pas agir au niveau du développement dans son ensemble, de la transformation des pratiques agricoles et des droits fonciers, est une erreur aujourd'hui reconnue ». Le cadre multilatéral n'est probablement pas le plus propice à ce type de discussions, pour le moins houleuses, et comme le notent Karsenty *et al.*, (2015), les discussions bilatérales seraient peut-être ici plus appropriées.

3) La pérennité des stocks fait face à une double incertitude politique et écologique. En l'absence des transformations politiques profondes pour s'attaquer aux déterminants de la déforestation, il est vraisemblable que les efforts actuels de protection des forêts ne suffisent pas à empêcher leur

destruction ou dégradation dans un futur proche (dès la fin de la période d'engagement d'un projet, par exemple). Les tendances projetées sur l'expansion agricole et les demandes de bois laissent même craindre une augmentation des pressions sur les forêts. Par ailleurs, sur les forêts préservées, des incertitudes portent sur les impacts à venir du changement climatique et sur ce qu'ils impliquent pour la santé des forêts et donc la pérennité des stocks de carbone qu'elles contiennent.

Comme le note, dans ses recommandations politiques, le récent rapport de l'European Academies Science Advisory Council (EASAC) sur les technologies à émissions négatives (EASAC, 2018), envisager d'utiliser les forêts pour retirer du carbone de l'atmosphère (notamment via le boisement et le reboisement) peut tendre à masquer l'importance de continuer de lutter contre la déforestation (surtout tropicale) qui constitue toujours une part massive des émissions de GES. Comme souligné ci-dessus, y parvenir suppose de mettre en place les réformes politiques et socioéconomiques s'attaquant aux déterminants de la déforestation, ce que la « simple » rémunération de projets forestiers par des crédits carbone ne semble pas être en mesure de faire.

1.2.2. Les sols agricoles et l'exemple du « 4 pour 1000 »

L'initiative du « 4 pour mille » a été lancée par la France en mars 2015, en amont de la COP21, et fait partie du Plan d'action mondial pour le climat. Initiative multi-acteurs, elle vise à encourager les pratiques agricoles permettant d'augmenter la teneur en carbone organique des sols. Le principe d'action climatique sous-jacent, dont l'initiative tire son nom, se base sur l'hypothèse qu'une augmentation de 0,4 %, soit 4 ‰, des stocks de carbone organique dans les sols du monde permettrait de compenser l'ensemble des émissions anthropiques de CO₂, et ce à moindre coût puisque les changements de pratiques agricoles préconisés sont faiblement intenses technologiquement parlant. Plus précisément, l'initiative se base sur le fait que la conversion d'écosystèmes naturels en agroécosystèmes conduit en général à une perte de carbone des sols (via l'érosion, la minéralisation et le lessivage), à hauteur de 30 à 50 % en 50 ans en milieu tempéré et jusqu'à des taux de 75 % en 10 à 25 ans en milieu tropical, et qu'il est possible, par l'adoption de bonnes pratiques, d'agir pour restaurer ces stocks de carbone (Lal, 2016). Les bonnes pratiques considérées regroupent l'agriculture de conservation, le paillage, les cultures de couverture, l'agroforesterie, le biochar, une meilleure gestion du pâturage, ou encore la restauration des sols par des aménagements du paysage (*ibid.*).

À l'instar des forêts et REDD+, l'ambition de l'initiative est de parvenir à rémunérer l'adoption de ces pratiques et d'ainsi encourager l'augmentation des stocks de carbone organique des sols. La proposition paraît simple en théorie, et susceptible de fournir des co-bénéfices importants en termes de qualité des sols et de sécurité alimentaire. On retrouve le « gagnant-gagnant » souligné dans le cas de REDD+. Mais à la suite du lancement de l'initiative, des incertitudes, scientifiques comme politiques, sont rapidement apparues (Aubert *et al.*, 2016).

Au sein des sciences du sol, on peut distinguer au moins cinq types de débats. Tout d'abord, en ce qui concerne les ordres de grandeur, la proposition initiale de compenser l'ensemble des émissions anthropiques de CO₂ par la séquestration de carbone organique dans les sols est revue à la baisse par les études les plus récentes. En effet, le potentiel d'augmentation des stocks de carbone se situant essentiellement au niveau des sols agricoles, et les changements de pratiques n'influençant à moyen terme que les stocks de carbone contenus dans le premier mètre des sols, il est proposé que le potentiel d'intervention maximal de l'initiative soit de compenser de 20 à 35 % des émissions totales de GES annuelles (1,9-3,1 Gt C) (Minasny *et al.*, 2017). Smith (2016), quant à lui, estime ce potentiel encore plus bas, à hauteur de 0,7 GtC/an. Ensuite, des objections ont été faites sur la temporalité : une thématique de recherche importante sur la matière organique du sol porte sur les mécanismes de saturation des sols en carbone, et il a été montré par des expériences de long terme que l'accumulation de carbone consécutive à des changements de pratique pouvait être divisée par deux en 10 ans, par quatre en 25 ans, et tomber à quasiment zéro en 50 ans (voir discussion de ce point dans Baveye *et al.*, 2017). Une incertitude majeure porte donc sur la durée pendant laquelle des changements de pratiques induiront en effet une augmentation de la teneur des sols en carbone de 4 % par an. Minasny *et al.*, (2017) suggèrent ainsi que le pic du taux d'augmentation de la teneur en carbone organique des sols pourrait être atteint en 10 à 20 ans, avant de décroître. Mais se pose également la question de la pérennité de ces stocks, en particulier dans le cadre de l'augmentation des températures, qui tend à stimuler la minéralisation de la matière organique des sols. Ainsi, Crowther *et al.*, (2016) estiment que la perte de carbone des sols liée au réchauffement d'ici 2050 pourrait être équivalente à entre 12 et 17 % des émissions anthropiques attendues sur la période ; et Baveye *et al.*, (2017) de souligner que l'initiative du « 4 pour mille », dans ce contexte, pourrait au final simplement compenser les pertes de carbone des sols liées à

l'augmentation des températures. Des auteurs, tels van Groeningen *et al.*, (2017), ont aussi souligné que la question des besoins supplémentaires en nutriments (azote, phosphore, notamment) pouvait constituer une forte contrainte sur la faisabilité du « 4 pour mille » au niveau mondial, même si cette contrainte peut trouver des réponses différenciées en fonction des territoires (Sousana *et al.*, 2017). Enfin, des auteurs soulignent l'importance de prendre en compte, dans le bilan GES des projets de l'initiative « 4 pour mille », les autres gaz, et notamment le N₂O et le méthane, dont les émissions pourraient être augmentées par certaines pratiques. Nonobstant ces difficultés, Minasny *et al.*, (2017) rapportent les conclusions d'études exploratoires sur la faisabilité technique du « 4 pour mille » dans 20 pays, et considèrent que le potentiel de l'initiative est réel pour améliorer l'état des sols et contribuer, ne serait-ce qu'à relativement court terme, à l'augmentation des stocks de carbone organique des sols.

En termes d'incertitudes politiques et opérationnelles, il faut tout d'abord noter que le suivi de l'augmentation des stocks de carbone des sols sur une exploitation agricole, l'attribution de ces évolutions à telle ou telle pratique, ou encore la compréhension de l'influence de facteurs extérieurs aux pratiques agricoles (e.g., influence du réchauffement à moyen terme) posent de sérieux défis de métrologie, et le risque de reproduire la « bureaucratie carbone » décriée pour REDD+ est importante dans ce cadre. Des membres de la société civile ont aussi rapidement émis des doutes quant à la capacité d'une initiative focalisée sur le carbone à effectivement traiter de manière pertinente des enjeux de sécurité alimentaire : celle-ci repose sur quatre piliers – disponibilité, accès, qualité et stabilité –, dont seul le premier et, dans une moindre mesure, les deuxième et quatrième, sont directement affectés par un accroissement des stocks de carbone organique des sols. Pour finir, comme dans le cas de REDD+, c'est bien sur la capacité transformationnelle réelle de l'initiative « 4 pour mille » que reposent le plus de doutes. Comme le notent Aubert *et al.* (2016) : « Enfin, sur le plan politique, la capacité du 4 % à mobiliser les acteurs et à faire émerger des projets concrets sur le terrain doit être questionnée. Le bilan des initiatives volontaires et multi-acteurs du même type qui ont été conduites au cours des 15 dernières années est en effet pour le moins mitigé : soit celles-ci n'ont finalement rien produit, soit elles ont conduit, par le biais d'une opération essentiellement discursive, à parer d'une nouvelle vertu des pratiques relevant du business as usual. » D'un point de vue politique, la pérennité du stockage se pose donc également ici, des décennies d'efforts et de financements pour restaurer

un sol pouvant être réduits à néant en seulement quelques années à la suite du retour des pratiques agricoles intensives.

1.2.3. Le carbone bleu : les océans et les écosystèmes côtiers

Objet émergent autour des négociations climat, le « carbone bleu » se réfère au carbone biogénique stocké dans les écosystèmes côtiers et marins. De manière explicite pendant les dernières COP, différents acteurs étatiques et non étatiques ont appelé à un mécanisme analogue à REDD+ pour rémunérer les politiques et pratiques permettant de préserver ces écosystèmes et le carbone qu'ils contiennent, voire d'accroître les stocks de ce dernier.

La nature même de l'objet « carbone bleu » est encore soumise à discussion. De manière majeure pour l'instant, les auteurs tendent à restreindre la perspective au carbone contenu dans les écosystèmes côtiers, en particulier les mangroves, les herbiers et les zones humides côtières. Les stocks de carbone contenus dans ces écosystèmes sont estimés à entre 10,4 et 25,1 milliards MgC (Howard *et al.*, 2017), soit entre 10,4 et 25,1 GtC. À cause de la déforestation des mangroves et la destruction des autres écosystèmes côtiers sous la pression du développement d'infrastructures, de l'agriculture et de l'aquaculture, mais aussi des pollutions côtières et du chalutage profond, ces écosystèmes subissent une destruction accélérée. Dans une logique similaire à REDD+, donc, de nombreuses voix étatiques et non étatiques se font entendre pour réclamer un mécanisme de financement de la protection de ces écosystèmes via la rémunération du carbone.

Deux grands types de raisons ont justifié jusqu'à présent la focalisation sur les écosystèmes côtiers au détriment de la haute mer. La première porte sur le fait qu'il est estimé que le carbone côtier est séquestré beaucoup plus longtemps, dans les sédiments, que ne l'est le carbone fixé au large par le phytoplancton (Howard, 2017 ; Hufford, 2017). Par ailleurs, ces recherches sur le carbone bleu faisant en général des recommandations vis-à-vis de la CCNUCC, elles se focalisent sur les écosystèmes sous juridiction nationale, là où les États sont souverains et où les actions de conservation sont censées pouvoir être plus facilement mises en place et rémunérées. Néanmoins, les connexions multiples entre les écosystèmes côtiers et le large, notamment par l'export de biomasse, tendent à rendre ces frontières plus floues. Krause-Jensen & Duarte (2013) montrent ainsi que les macroalgues côtières contribuent substantiellement à la séquestration marine du carbone (entre 61 et 268 TgC/an), mais que 90 % de ce carbone est séquestré dans les

sédiments en haute mer, via des mécanismes de transports des débris de macroalgues vers le large. Similairement, pendant la COP23, les acteurs militant classiquement pour le carbone bleu, comme l'UICN, ont ouvertement posé la question du carbone bleu en haute mer, reconnaissant que sa significativité climatique était trop importante pour se contenter de l'argument des juridictions nationales, et qu'il y avait peut-être manière à innover dans les discussions, notamment en construisant des ponts entre les discussions de la CCNUCC et le droit marin.

Sujet encore à peine émergent, on voit néanmoins apparaître au sein des discussions sur le carbone bleu les mêmes types d'incertitudes pointées précédemment pour les forêts et les sols agricoles. La capacité transformationnelle d'initiatives visant à rémunérer le carbone bleu, et ne s'attaquant pas aux déterminants de la dégradation des écosystèmes côtiers et de la perte de carbone qu'ils contiennent, serait vraisemblablement faible. Par ailleurs, l'ajout des impacts multiples du changement climatique sur les écosystèmes marins et côtiers (Gattuso *et al.*, 2015) pose également la question de la pérennité de ces stocks au cours du siècle.

1.3. Technologies à émissions négatives : une approche par la précaution

La difficulté à réduire les émissions anthropiques de GES a depuis maintenant assez longtemps conduit au développement de propositions technologiques visant à retirer activement le CO₂ de l'atmosphère. Le développement des recherches sur le sujet est exponentiel, Minx *et al.*, (2017) rapportant une accumulation de 2 900 études sur le sujet entre 1991 et 2016, et 500 publications en 2016 uniquement. Dans ce que l'on regroupe à présent sous l'appellation de « technologies à émissions négatives » (TEN, NETs pour l'acronyme anglais), l'on retrouve une grande diversité de propositions, allant de la capture et stockage du carbone (CSC) à l'action de conservation des puits de carbone commentée dans les paragraphes précédents. Par choix analytique, nous avons ici choisi de traiter cette dernière séparément, dans la section 1.2., car elle nous semble relever principalement de changements dans l'usage des terres et des milieux, et traiterons ici des TEN relevant plus directement de solutions technologiques, plus ou moins sophistiquées, qui reposent sur des procédés industriels ou l'addition de constituants anthropiques aux écosystèmes pour modifier les taux de certains processus naturels.

Toutefois, même avec cette restriction du périmètre, il n'est pas possible de discuter

succinctement de l'ensemble des propositions pouvant se qualifier de TEN, d'autant que des débats existent sur ce qui mérite ou non ce qualificatif. Nous n'en commenterons ici que 4, qui sont celles principalement commentées par la littérature (Minx *et al.*, 2017) et que l'on retrouve dans le rapport de l'EASAC sur le sujet (EASAC, 2018). Pour chacune d'elle, nous présenterons de manière synthétique son principe, le potentiel de retrait de CO₂ atmosphérique qui lui est attribué, ainsi que les incertitudes inhérentes à leur taux de maturité et potentiel de déploiement.

1.3.1. Les différentes technologies à émissions négatives

Le BECCS (Bio-energy with carbon capture and storage). Mentionné précédemment, le BECCS est omniprésent dans les scénarios compatibles avec l'objectif des 2°C. Son principe repose sur le fait que la biomasse végétale capture le CO₂ pendant son développement, via la photosynthèse, et le stocke sous forme organique (les troncs, les branches, les racines etc.). Cette biomasse est ensuite brûlée en centrale, pour produire de l'électricité par exemple, et le CO₂ résultant de cette combustion est capturé et stocké sous terre, le retirant ainsi de l'atmosphère. Comme évoqué précédemment au sujet du RCP2.6, les scénarios compatibles avec l'objectif des 2°C dans le dernier rapport du Giec font un usage massif de cette technologie, en lui octroyant un potentiel de retrait de CO₂ de l'atmosphère allant de 2 à 10 Gt de CO₂ par an d'ici 2050 (Fuss *et al.*, 2014).

Comme le note le rapport de l'EASAC (EASAC, 2018), néanmoins, un déploiement à cette échelle pose de nombreuses questions. Tout d'abord, en ce qui concerne la production de biomasse pour alimenter l'amont de la technologie, la quantité de terres nécessaires à une telle production de biomasse est massive, dans un contexte de pression déjà exacerbé sur l'usage des terres et la conservation des écosystèmes. Smith *et al.*, (2016) estiment par exemple que, pour l'utilisation de résidus forestiers, il faut entre 1 et 1,7 ha de terres disponibles par tonne équivalent carbone retirée de l'atmosphère par an via le BECCS. Ainsi, mobiliser les BECCS à hauteur de 1 GtC/an (limite basse des scénarios RCP 2.6) occuperait déjà entre 1 et 1,7 Gha de sols, à comparer à la SAU mondiale (5 Gha dont 1,5 de cultures et 3,5 de parcours pour le bétail) et la surface forestière totale (4 Gha). Des compétitions avec la production alimentaire, notamment, seraient à attendre. Les besoins en nutriments, et en eau, viendraient induire des pressions environnementales supplémentaires. Enfin, les visions les plus optimistes du BECCS supposent en général

que l'ensemble du carbone fixé par les végétaux est stocké, tandis qu'il faut inclure au bilan les pertes et émissions liées à la récolte, la transformation, etc., des végétaux. De plus, atteindre le potentiel envisagé par Fuss *et al.*, (2014) en 2050 supposerait que la production d'électricité en 2050 soit couverte pour 20 à 40 % par des BECCS : c'est, à un horizon finalement assez court, un paradigme électrique très différent de celui que nous sommes en train de développer, et il faudrait donc rapidement envisager une réorientation très massive des investissements. Mais en aval de la technologie, sur la partie CSC, les estimations du potentiel de BECCS sont également très optimistes, car les tendances actuelles du déploiement du CSC rendent très incertaine sa disponibilité à l'échelle nécessaire et dans les décennies à venir (EASAC, 2018). Par ailleurs, le potentiel de déploiement du CSC devra se partager entre le BECCS et son utilisation pour stocker les émissions énergétiques ou industrielles résiduelles, ce qui peut induire une compétition sur le potentiel de CSC (Fuss *et al.*, 2014).

Capture directe du CO₂ dans l'air et stockage (Direct air carbon capture and storage - DACCS). Cette technologie repose sur la circulation de l'air ambiant au travers d'un dispositif qui retire sélectivement le CO₂ de l'air, via la réaction avec des absorbants liquides ou solides. L'air expurgé du CO₂ est ensuite redirigé vers l'atmosphère, tandis que le CO₂ est libéré de l'absorbant pour son stockage ou son utilisation, et l'absorbant régénéré. Psarras *et al.*, (2017) attribuent un potentiel d'émissions négatives de 3,3 GtC/an au DACCS.

Le déploiement du DACCS occasionnerait bien moins de compétition pour l'usage des terres que le BECCS (Smith *et al.*, 2016). Le processus demanderait néanmoins un approvisionnement énergétique, et de l'eau dans le cas où les absorbants nécessiteraient d'être réhydratés. Le DACCS serait aussi tributaire des capacités de stockage du CO₂ retiré de l'atmosphère, avec toutefois un avantage certain sur les autres technologies faisant appel au CSC : la possibilité de localiser les installations en fonction des capacités de traitement (eau) et de stockage (géologie, réutilisation), mais indépendamment des points d'émission, supprimant ainsi les contraintes infrastructurelles et logistiques. À noter que cette technologie est par ailleurs une option pour le déploiement de vecteurs carbonés (gaz, carburants) issus de la production d'hydrogène : c'est une option complémentaire des voies biologiques envisagées (comme l'utilisation des microorganismes méthanogènes) permettant de valoriser un CO₂ atmosphérique recyclé et aboutissant à un bilan neutre pour des émissions diffuses (aviation, transports terrestres, etc.).

Érosion augmentée. Lorsque des silicates ou carbonates se dissolvent dans l'eau de pluie, le CO₂ atmosphérique est capturé dans la solution pour former des ions bicarbonates. Une fois ces ions arrivés dans les océans, ils sont utilisés par les organismes qui fixent le calcium (mollusques, crustacés, coraux, phytoplancton, etc.), et le carbone est ainsi séquestré à relativement long terme dans leurs coquilles/squelettes et les sédiments. Le principe de l'érosion augmentée est d'accroître le taux de ces réactions, en ajoutant des minéraux silicates ou carbonates aux sols et aux océans, par exemple en recouvrant des terres d'une fine pellicule de roches silicatées broyées (EASAC, 2018). Le potentiel d'émissions négatives de cette technique est estimé à 1 GtC/an par Kölher *et al.*, (2010).

L'érosion augmentée a surtout été explorée théoriquement, avec peu de tests en laboratoires et aucun projet pilote (EASAC, 2018). Ces techniques nécessiteraient vraisemblablement de larges efforts pour l'extraction minière, le transport et l'utilisation d'importantes quantités de minéraux, ainsi que de larges surfaces disponibles pour les épandre.

Fertilisation des océans. L'idée de fertiliser les océans, notamment en apportant du fer, pour stimuler la productivité du phytoplancton, et donc son absorption de CO₂, n'est pas nouvelle. Néanmoins, en raison de la difficulté à contrôler le type de plancton qui se développerait, les multiples effets en cascade sur les écosystèmes marins et leur productivité, et la faible durée de séquestration du carbone dans le plancton, le potentiel d'émissions négatives de cette méthode est estimé à moins de 1 GtC par an, avec d'importantes incertitudes sur ses impacts sur les écosystèmes marins (EASAC, 2018).

1.3.2. Une approche par la précaution

De cet aperçu de quelques TEN principales, il apparaît surtout que les incertitudes quant à leur déploiement sont importantes et de nature différente. Contrairement à ce que leur omniprésence dans les scénarios pourrait laisser entendre, leur disponibilité réelle pour faire face au défi climatique ne devrait pas être tenue pour acquise, et leur considération comme option devrait être soumise au principe de précaution dans son sens plein, c'est-à-dire qu'elles devraient faire l'objet de recherches ; comme soutien aux efforts de réductions d'émissions, et non comme une panacée (Fuss *et al.*, 2014 ; Anderson & Peters, 2016).

Fuss *et al.*, (2014) proposent une approche en quatre composantes pour traiter des incertitudes liées aux TEN. (i) Il s'agit tout d'abord d'évaluer le potentiel de la technologie par rapport à d'autres critères de durabilité. Ici, le BECCS semble bien moins avantageux, en raison de la pression qu'il représenterait pour l'usage des terres, que le DACCS, par exemple. (ii) Ensuite, il est nécessaire de replacer la technologie dans notre compréhension des dynamiques du cycle du carbone. En prenant encore une fois l'exemple du BECCS, s'il était déployé dans un contexte de changement climatique avancé, les impacts du changement climatique sur la productivité des écosystèmes rendraient très incertain le niveau de disponibilité en biomasse. (iii) Le besoin d'intégrer les TEN au sein des réflexions sur les autres mesures d'atténuation possibles, afin d'évaluer leur pertinence, notamment en termes de temps de déploiement. Pour le BECCS, faire parvenir la technologie à l'échelle suffisante prendrait des décennies avec un début de déploiement massif aujourd'hui, et d'autres actions sont probablement plus pertinentes. (iv) Enfin, compte tenu des asymétries

Tableau 1. Résumé des forces, faiblesses et incertitudes des émissions à technologie négative négative (Adapté de EASAC, 2018).

	BECCS	Erosion augmentée	DACCS	Fertilisation océans	CCS
Phase de développement technique	Démonstration	Recherche	Démonstration/Commerciale	Recherche	Démonstration/Commerciale
Potentiel selon la littérature (GtC/an)	3.3	1	3.3+	<1	4+
Coût estimé ^(a)	Modéré	Modéré	Modéré/ Elevé	Faible/ Elevé	Faible
Quantité de CO ₂ retiré concordant selon les différentes applications ?	Au cas par cas	Incertain	Oui	Incertain	Oui
Sécurité du retrait de CO ₂ sur le long-terme ?	Vulnérable ^(b)	Oui	Oui ^(c)	Incertain	Oui ^(c)
Possibilité d'un effet inverse sur le climat ^(d) ?	Oui	Non	Non	Oui	Non
Effets importants sur les écosystèmes et la biodiversité probables ?	Oui	Incertain	Non	Oui	Non

^(a) Faible : <100€ tCO₂ ; Modéré : 100-400€ tCO₂ ; Elevé : > 400€ tCO₂

^(b) Du fait du changement climatique, des incendies, des animaux nuisibles, des maladies, des changements de politiques forestières.

^(c) En postulant que des sites géologiques adaptés et sûrs sont utilisés pour le stockage.

^(d) Par exemple, émission d'autres GES, effets du changement d'utilisation des sols, albedo.

dans les émissions de GES, le partage des coûts et des risques liés au déploiement des TEN sera lui aussi un sujet contentieux, et un cadre institutionnel robuste pour organiser ces discussions sera nécessaire.

Le Tableau 1, adapté du rapport de l'EASAC (EASAC 2018), fait une synthèse des ordres de grandeurs et différentes incertitudes liées à chacune des TEN discutée ici. Il est important de noter aussi que les options ci-dessus, lorsqu'elles font appel au CSC, en modifient le profil de risque environnemental : proposer aujourd'hui d'utiliser le CSC pour préférer le développement de capacités de production d'électricité à base d'énergies fossiles quand d'autres options sont disponibles, c'est poser la question de la responsabilité prise en cas de non-permanence des stockages, et donc de ne pas réduire autant que possible, compte tenu des technologies disponibles et de leur coût, les émissions brutes. Envisager, demain, de mobiliser le CSC pour retirer du carbone de l'atmosphère c'est, en cas de rejets partiels des quantités injectées, une question d'efficacité, donc de coût relatif à d'autres options de stockage.

1.4. Le poids des différents GES

Le changement climatique est provoqué par l'émission de différents GES, où dominent le CO₂, le CH₄ et le N₂O, et la notion de neutralité carbone, ou de décarbonation des économies, est un raccourci pratique mais inexact du problème. Les différentes communautés scientifiques qui participent à l'élaboration des scénarios d'émissions, et à leur évaluation en termes de réchauffement, ont des pratiques différentes pour traiter cette question. Pour les climatologues, un RCP est caractérisé par des trajectoires d'émissions distinctes et spécifiques pour chaque gaz à effet de serre, donnant à chaque instant une composition de l'atmosphère qui sert d'input pour leurs modèles ; ainsi, pour le RCP2.6, l'élévation de température et les autres caractéristiques du système climatique à 2050 ou 2100 qui font aujourd'hui de ce scénario le modèle emblématique d'une compatibilité 2°C répondent à un équilibre déterminé de composition atmosphérique entre les différents GES, issu des exercices produits par la communauté des IAMs. Pour le CO₂, les émissions deviennent ainsi nulles, puis négatives après le milieu du siècle, tandis que les émissions de méthane anthropiques sont réduites de 370 Mt actuellement à environ 200 Mt vers 2050, et que les émissions de N₂O sont à peu près constantes à 9,7 Mt. Mais pour obtenir ces trajectoires, la communauté des IAMs utilise une compatibilité agréée en ayant recours aux PRG (pouvoir de réchauffement global) à 100 ans. L'ensemble des

options de réduction est ainsi comparé en termes de coût d'abattement par tonne de « CO₂ équivalent », puis les options mobilisées en fonction du prix du CO₂. Mais le recours à une valeur unique de PRG pour estimer l'impact des émissions des différents gaz à un horizon donné a depuis été critiqué, en raison de la sous-évaluation systématique que cette méthode implique pour les gaz à faible durée de vie (Dessus *et al.*, 2017).

Cette approche pose trois questions :

La première est que la relation entre niveau de réchauffement climatique et niveau d'émissions dans le RCP2.6 ne vaut qu'en respectant strictement les trajectoires spécifiques des différents gaz, et n'est plus valable pour un mix différent dont la valeur en tonnes équivalent CO₂ serait identique. Dessus *et al.*, (2017) montrent ainsi qu'une stabilisation des émissions de méthane conduirait à une élévation de température supplémentaire d'un demi-degré à l'horizon 2100. Cette augmentation ne serait pas compensée par une réduction additionnelle des émissions de CO₂ « équivalente » sur la base du PRG à 100 ans. Peut-on, alors, considérer que l'effort relatif proposé par ce scénario entre les différents gaz est robuste, ce qui impose de le respecter ? Ou peut-on chercher à s'en écarter, mais avec la précaution alors de réévaluer systématiquement les équilibres à respecter pour rester dans un scénario 2 °C ?

La seconde est que, précisément, la méthode utilisée fragilise les trajectoires proposées : en hiérarchisant les actions sur l'ensemble des options de réduction, tous gaz confondus, sur la base d'un coût marginal rapporté à la tonne équivalent CO₂ économisée (ou captée), on obtient par définition une suite d'actions dépendante du PRG utilisé. Dès lors, la remise en question du PRG à 100 ans comme équivalent entraîne une réévaluation de la hiérarchie des actions mobilisées par le modèle (au profit d'un effort plus important sur le méthane et par conséquent sur le N₂O, et moindre sur le CO₂).

La troisième est que l'identification des options d'abattement s'appuie presque exclusivement sur des approches technologiques, avec une très grande asymétrie de fait entre le secteur de l'énergie et du CO₂ (où les technologies permettent d'envisager systématiquement des solutions zéro émissions et, à terme, des émissions négatives) et les émissions de méthane du secteur des énergies fossiles (aujourd'hui un tiers des émissions de méthane). Ces dernières sont certes fortement réduites par la diffusion de technologies plus efficaces à la production (émissions au niveau des puits), le transport (fuites) et l'utilisation (combustion), mais la récurrence d'émissions dans ce secteur dépend également de la part d'énergies fossiles encore présentes en 2050 dans le bilan,

dans des scénarios où le recours au CSC est important. Le secteur agricole est également en jeu, où les technologies ne permettent que des réductions partielles. Inversement, les évolutions de modes de vie ou de consommation ne sont pas abordées, ou plus exactement traitées en poursuivant les tendances historiques de mondialisation des modèles dominants, sans que ces hypothèses ne soient explicitement discutées (ni facilement accessibles au lecteur).

Mais les hypothèses de réduction mobilisées sur les différents secteurs (riz, fossiles, déchets, etc.) conduisent à estimer que la fermentation entérique représenterait de 140 à 160 Mt de méthane sur les 200 Mt encore émises à l'horizon 2050 dans le scénario associé à la RCP2.6, ce qui constitue une augmentation de près de 50 % par rapport aux estimations du niveau actuel d'émissions de méthane issu de la fermentation entérique (Lucas *et al.*, 2007). Si l'on peut envisager une amélioration de l'ordre de 25 % de l'intensité méthane du cheptel ruminant, cela correspondrait à minima à un doublement de la production de ruminants en 2050 par rapport à 2016. Dit autrement, la consommation atteindrait au niveau mondial quelque 16 à 22 kg de viande bovine (ou ovine) par habitant (selon les hypothèses pour la production laitière), à comparer au niveau français actuel de 23 kg. Cette augmentation de la production bovine entraînerait simultanément des émissions additionnelles de N₂O pour la production végétale (pour l'alimentation des animaux), ce qui explique la constance des émissions à 2050 malgré le progrès technique, et renforce les concurrences sur les sols.

Le propos n'est pas de discuter la robustesse d'une telle hypothèse de généralisation d'un mode de consommation, mais de remarquer que ce qui fait débat aujourd'hui dans de nombreuses sociétés, pour des raisons très diverses (éthique, santé publique, culture) et conduit à envisager comme une hypothèse de travail réaliste un rééquilibrage des régimes alimentaires vers moins de produits carnés, et des substitutions au profit des monogastriques, n'est à ce stade pas pris en compte ici. Dans son dernier rapport d'évaluation, le Giec a pour la première fois évalué les connaissances sur le potentiel de réduction d'émissions lié au changement de régime alimentaire, et les études évaluées donnent une fourchette de réduction d'émissions de 4,3-7,3 GtCO₂eq (IPCC, 2014). Le nouveau rapport du Giec en préparation s'ouvrira plus amplement à ces débats, et les développeurs d'IAMs ont récemment commencé à intégrer l'évolution des modes de vie – voir par exemple van Sluisveld *et al.*, (2016) pour un cas utilisant IMAGE et explorant le potentiel de réduction d'émissions lié aux changements de modes de vie dans l'énergie résidentielle, la

mobilité et la gestion des déchets. Mais le décalage temporel entre production scientifique, rapport du Giec et débat public fait que nous travaillons aujourd'hui avec des projections dont il est important de comprendre les limites. En effet, un gain de 50 Mt sur les émissions de méthane en 2050 (niveau moyen de consommation mondial égal aux 2/3 du niveau français actuel) correspond, avec un PRG à 2100, à 2,4 Gt de CO₂. C'est, en comptant les N₂O associés, un abattement d'un ordre de grandeur comparable aux BECCS mobilisés dans le RCP2.6.

1.5. Faire atterrir l'objectif de neutralité

Comme le note son président en préface du rapport de l'EASAC sur les technologies à émissions négatives (EASAC, 2018), l'urgence de réduire les émissions de GES continue à être masquée par une certaine croyance dans le secours que pourront apporter les innovations technologiques. Comme cette section l'a montré pour l'intervention sur les puits de carbone (1.2.), cela vaut également pour des actions relevant de l'ingénierie écologique, où l'espoir qu'une juste rémunération de la séquestration biogénique du carbone suffirait, en elle-même, à transformer de manière pérenne des secteurs aussi complexes que l'agriculture, l'aménagement côtier, voire la pêche en haute mer. Un dénominateur commun à beaucoup de ces approches est la sous-estimation récurrente des difficultés à saisir, puis engendrer les transformations sociales et sociotechniques nécessaires pour relever le défi climatique.

Ce constat s'explique probablement par le fait que la plupart du travail de recherche sous-jacent à ces propositions relève des sciences de l'ingénieur ou des sciences naturelles, ou de certains paradigmes économiques qui tendent à simplifier les déterminants comportementaux des agents. L'imaginaire entretenu par l'expertise climatique internationale, prise à large trait, continue ainsi à privilégier les discussions sur les solutions technico-économiques, même si encore abstraites et prises à un niveau « global », plutôt que de promouvoir un dialogue, ancré sur des territoires et avec des acteurs concrets, sur les manières de créer les transformations nécessaires à une décarbonation profonde des sociétés, intégrant à la fois les transformations des technologies, des comportements, des modes de vie, des politiques.

Toutefois, comme souligné précédemment, les approches globales comme celle des IAMs ont l'avantage de permettre de projeter la somme des efforts « locaux » sur le système climatique et son futur, et c'est une de leur contribution majeure aux débats climatiques, qu'il faut pouvoir préserver. La

complexité impressionnante de la vaste infrastructure de modélisation climatique confère une très forte inertie aux différentes orientations épistémologiques et méthodologiques. Comme le notent Guivarch et Hallegatte (2013), les demandes venant des négociations (e.g., « quelles trajectoires d'émissions et options d'atténuation possibles pour rester sous les 2°C ? ») ont poussé les communautés de modélisateurs à trouver des réponses dans les limites de leurs outils, au travers de différentes incitations (morales, pour réussir à proposer des solutions pour rester sous les 2°C ; mais aussi financières, car les agences de financements tendent à privilégier l'optimisme technologique ; Guillemot, 2017). Ceci explique en partie l'omniprésence, dans les scénarios analysés par le Giec, d'objets comme le BECCS.

S'il existe différents appels et tendances à développer de nouveaux outils de modélisation économique permettant de mieux explorer les rouages de l'action individuelle et collective en lien avec le climat (voir par exemple les mots forts de Nicholas Stern dans *Nature* ; Stern, 2016), un ensemble de recherches reste à mobiliser, des méthodes à inventer, pour explorer ce que la neutralité carbone veut dire pour un territoire donné, et construire un dialogue avec les approches globales pour évaluer ce que ces contributions « individuelles » des territoires veulent dire pour le système Terre. Dans cette réflexion, le « modèle » suggéré par les exercices globaux (IAM) et popularisé par les rapports du Giec ne doit pas être pris à la lettre : la mobilisation des puits biologiques est bien évidemment une voie à poursuivre, mais les potentiels évalués par les scientifiques couvrent d'importantes fourchettes (rapports de 1 à 10) et leur niveau de mobilisation par les IAMs, déterminé par une évaluation nécessaire pour ces modèles, mais fragile, de coûts marginaux d'abattement, reste un défi en pratique. Simultanément, le recours massif aux émissions négatives technologiques, et exclusivement au moyen des technologies de BECCS, doit être pris pour ce qu'il signifie : le besoin, pour ces modèles, de définir une forme de « backstop technology » permettant, compte tenu des autres hypothèses sur les émissions anthropiques et leur potentiel d'abattement, de répondre à l'impératif d'un scénario menant à des niveaux très bas de concentrations de GES à la fin du siècle malgré une dynamique actuelle peu favorable. Cela doit nous inciter à approfondir les options possibles pour ces émissions négatives (et à ne pas se focaliser sur les BECCS), mais également à avoir conscience du risque à se reposer sur des options encore très incertaines quant à leur potentiel réel, et notamment leur contribution à un horizon de 30 à 50 ans, pour atteindre nos objectifs.

Mais cela impose également de revenir sur les équilibres proposés entre différents gaz à effet de serre, qui eux également découlent d'hypothèses inégalement radicales mais aussi d'une focalisation sur les potentiels d'abattement techniques, en parallèle à une réflexion peu approfondie sur les modes de vie et de consommation et les niveaux d'activité correspondants pour les différentes filières. C'est pourtant de ces équilibres que s'impose une représentation schématique, optique, de la neutralité : un passage au point « zéro nettes émissions » en milieu de siècle (en comptabilité multigaz) et à partir de là une neutralité précoce pour le CO₂ (mais en équilibrant émissions brutes, puits et émissions négatives) qui compense les émissions des autres GES dont les trajectoires sont fragiles, et pour lesquels la « mise en politique » reste un défi. Mais le risque est également de cloisonner la pensée, en construisant nos visions stratégiques autour d'objectifs « par gaz » contingents aux modèles aujourd'hui utilisés.

2. INITIATIVES NATIONALES AUTOUR DE LA NEUTRALITÉ CARBONE : UN PANORAMA COMMENTÉ

Comme souligné dans la section précédente, la neutralité carbone est un de ces objets hybrides nés de l'arène climatique, dont la mobilisation politique a commencé avant que ses contours soient tout à fait définis. Cette innovation est bienvenue, d'autant qu'elle a le potentiel de faire bouger les lignes des discussions. Il est néanmoins important de suivre les différentes pistes qui ont déjà commencé à être explorées, pour en tirer des enseignements pour l'élaboration de stratégies nationales bas carbone, notamment en cherchant à les passer au crible des intentions présentes dans l'Accord de Paris et son article 4.1. Garder un œil critique, constructif, et s'instruire des expériences en cours dans différents pays, est l'objectif général de cette section.

Les États, qui sont en charge des initiatives politiques et économiques à l'échelle de leurs territoires, constituent l'échelon en charge des discussions multilatérales où chaque partie est amenée à rendre compte, dans le cadre de l'Accord de Paris, de la mise en œuvre des contributions déterminées au niveau national (CDN, NDC en anglais). Mais ils devront aussi préparer les prochaines CDN, dans un objectif d'accroissement de l'ambition. Les stratégies de neutralité des gouvernements sont donc importantes, à la fois sur le fond (ce qu'il y a dedans) et sur le processus (sont-elles « réelles »), car ce sont elles qui vont faire le lien entre l'objectif global, que les pays ont signé, et sa mise en œuvre effective dans la réalité.

Cette section propose un panorama commenté des pays où des annonces gouvernementales ont été faites autour de la neutralité carbone après l'Accord de Paris. La sélection des pays s'est concentrée sur ceux où il nous a paru y avoir le plus de substance à commenter. L'analyse s'est attachée à décrire, pour chaque pays, le contexte historique récent et le contexte politique où a été faite l'annonce, et le contenu des annonces et/ou documents officiels lorsque disponibles, pour analyser la manière dont la neutralité carbone a été introduite dans les débats nationaux et dont l'atteinte de la neutralité est envisagée. Il s'est agi, en particulier, de comprendre, pour les pays qui proposent déjà une vision plus précise, quels nouveaux horizons la neutralité carbone implique, et si les pays se sont servis de la neutralité pour explorer de nouvelles options d'action climatique. Sept pays ont été analysés : l'Allemagne, le Costa Rica, la Suède, la Finlande, l'Irlande, le Royaume-Uni et la Nouvelle-Zélande.

2.1. Études de cas nationales

2.1.1. Allemagne

Contexte énergétique. L'Allemagne a initié son tournant énergétique en 2000 avec la sortie du nucléaire et la première loi sur les énergies renouvelables (ENR). En 2010, l'Energiekonzept a détaillé la stratégie énergie-climat du gouvernement allemand sur le long terme autour de plusieurs objectifs phares (voir Tableau 2).

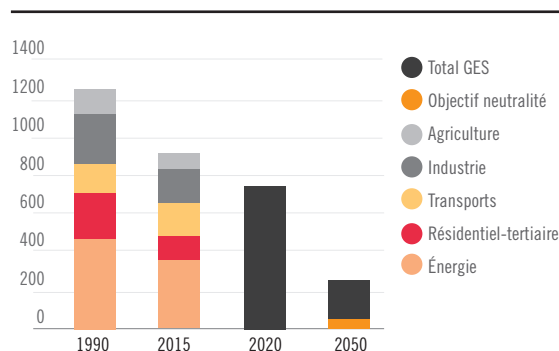
Tableau 2. Objectifs de la stratégie énergie-climat allemande

	2020	2030	2040	2050
Réduction des émissions de GES (base 1990)	-40 %	-55 %	-70 %	-80 à -95 %
Réduction conso. énergie primaire (base 2008)	-20 %			-50 %
Réduction conso. primaire - bâtiments	-20 %			-80 %
Part renouvelable – consommation finale	18 %	30 %	45 %	60 %
Part renouvelable – consommation d'électricité	35 %	50 %	65 %	80 %

État des lieux des politiques climatiques. Fin 2015, l'Allemagne affichait une baisse de ses émissions de GES de -27,9 % par rapport à 1990. La baisse la plus forte a été enregistrée dans le secteur résidentiel-tertiaire (-42 %), tandis que le secteur des transports n'a quasiment pas diminué (-1,8 %) et que le secteur de l'énergie, très dépendant du charbon pour la production d'électricité, reste en-deçà des objectifs et du potentiel, avec une réduction

de 26 %¹. Malgré ces résultats encourageants, les rapports d'évaluation indiquaient depuis 2013 que l'Allemagne risquerait de ne pas atteindre son objectif 2020 (-40 % de GES). Afin d'y remédier, un nouveau programme d'actions pour la protection du climat a été adopté fin 2014, prévoyant des mesures supplémentaires dans l'ensemble des secteurs et en particulier pour l'efficacité énergétique et le développement des ENR chaleur.

Figure 1. Émissions de GES en Allemagne : historique et objectifs 2020 et 2050



Source : auteurs

La prise en compte progressive de l'objectif « neutralité climat » dans le débat politique. Dès 2011, l'important travail de modélisation pour établir une trajectoire « phare » de décarbonation à long terme incluait déjà une variante atteignant la limite haute de l'objectif climat pour 2050 (baisse 95 % des émissions de GES), tout en estimant que celui-ci ne pouvait être atteint qu'en 2060 au lieu de 2050 (DLR, Fraunhofer IWES, & IFNE, 2011). En 2014, l'Agence de l'environnement allemande a publié une autre étude pour illustrer une vision énergétique compatible avec la neutralité carbone en 2050, fortement basée sur la production d'électricité renouvelable et les combustibles (gazeux et liquides) dérivés (UBA, 2014)². Focalisée sur la seule année 2050, cette étude n'élabore pas de trajectoires de mise en œuvre, ce qui a quelque peu freiné sa prise en compte dans les débats sur le renforcement des mesures à court et moyen terme. Enfin, ce n'est qu'après l'adoption de l'Accord de Paris fin 2015 que l'Allemagne a commencé à officiellement s'orienter vers la « neutralité climatique », avec le **plan climat adopté fin 2016, juste à temps pour**

1. Données Umweltbundesamt 2017 selon l'inventaire officiel GES de 2017.
2. Dans cette vision, la production d'électricité atteint jusqu'à 3 000 TWh en 2050, essentiellement utilisée pour fabriquer des combustibles dérivés (hydrogène, gaz de synthèse, carburants de synthèse), tandis que la consommation directe d'électricité diminue de 536 TWh en 2013 à 466 TWh en 2050.

la COP22 de Marrakech. L'élaboration de ce plan climat a été précédée par un important processus de consultation des parties prenantes (de juin 2015 à février 2017), aboutissant à la définition de plus de 100 mesures clés³. En parallèle, une analyse des trajectoires compatibles a été réalisée, démontrant notamment le nécessaire renforcement des mesures existantes (développement des ENR, réduction des consommations dans le bâti et transformation du secteur de la mobilité) et un possible redéploiement des objectifs (atteindre le -80 % en 2040 au lieu de 2050) pour atteindre ce niveau d'ambition⁴. Malgré de fortes attentes, la portée politique du plan climat de 2016 a finalement été limitée au fil des arbitrages politiques. Ainsi, au lieu d'indiquer des mesures spécifiques à moyen et court termes, le plan se cantonne à une vision plus « programmatique », déclinant l'objectif 2030 de manière sectorielle avec une vision qualitative des processus de transformation associés, mais sans inclure de mesures spécifiques⁵.

Quelle vision pour la neutralité carbone ?

Comme indiqué précédemment, la neutralité carbone est définie en Allemagne autour de l'objectif d'une réduction drastique des émissions de -95 %, tout en acceptant que des émissions résiduelles (provenant essentiellement du secteur agricole pour plus de la moitié) soient toujours présentes, pour converger vers une valeur inférieure à 1 tonne d'équivalent CO₂ par habitant et par an. En termes de périmètre, il est intéressant de noter que les scénarios allemands (notamment celui de l'Öko-Institut) n'incluent pas uniquement toutes les émissions de GES domestiques (y compris l'usage des terres), mais également la part nationale des émissions liées au transport international aérien et maritime.

Éléments d'analyse. L'Accord de Paris a été un déclencheur important dans la genèse d'un débat allemand sur le concept de neutralité climatique. Si l'ambition figure aujourd'hui officiellement dans les engagements politiques (le plan climat

2050), le débat reste pour l'instant focalisé sur la mise en œuvre des politiques et objectifs à court et moyen termes (2030). On peut néanmoins noter que les travaux de recherche prospectifs publiés par des acteurs indépendants (Öko-Institut, UBA) fournissent des éléments pertinents pour approfondir la réflexion sur les leviers et les adaptations nécessaires pour se placer sur une trajectoire de neutralité. En parallèle, il convient de noter que les exercices prospectifs associés à la neutralité ne vont pas forcément explorer de nouveaux leviers d'action (sobriété, modes de vie), mais se cantonnent essentiellement au renforcement des leviers technologiques et à l'utilisation de quelques leviers supplémentaires (comme les applications du CSC dans l'industrie).

2.1.2. Costa Rica

L'évolution énergétique du Costa Rica. Le pays connaît une croissance rapide, sur les plans démographique (augmentation de la population de 50 % en 20 ans) et économique, qui a entraîné un doublement de la consommation d'énergie finale depuis 1995 et des émissions nettes de GES en hausse de 46 % entre 2005 et 2012 (MINAE, 2015). Avec une production d'électricité déjà décarbonée à 90 % (essentiellement basée sur l'hydraulique, à 75 %, et la géothermie), le secteur le plus émetteur est de loin le transport, représentant près de 70 % des émissions du secteur énergétique, avec une flotte de véhicules qui a quadruplé en 20 ans.

Le Costa Rica, un précurseur de la neutralité climatique ? Déjà constitué en modèle de développement durable grâce à ses efforts en matière de préservation des écosystèmes, d'éco-tourisme et d'une production électrique très décarbonée (à 90 % renouvelable), le pays a frappé fort en annonçant, dès 2007, viser la « neutralité carbone » d'ici 2021, date du bicentenaire de l'indépendance du Costa Rica. Néanmoins, au-delà de l'effet d'annonce (très réussi), la concrétisation de cet objectif conserve de nombreuses incertitudes, à commencer par la définition confuse de l'objectif de neutralité. En effet, la première stratégie nationale de changement climatique de 2009 affiche la neutralité selon l'équation classique : E (émissions anthropiques)-R (réductions d'émissions)-C (séquestration)=0. Mais en creusant plus loin, on se rend compte que l'objectif visé était nettement moins ambitieux, à savoir : réussir un développement « neutre climatiquement », en neutralisant les émissions additionnelles (par rapport à 2005) par des actions d'atténuation, et de séquestration (puits de carbone). Autrement dit : l'objectif initial pour 2021 était de stabiliser

3. La préparation du processus de consultation des parties prenantes a fait l'objet d'une mission déléguée à un consortium et a donné lieu à un rapport d'évaluation spécifique (Prognos AG, 2017).

4. Voir également le papier de mise en perspective de différents scénarios de « neutralité » pour l'Allemagne (Öko-Institut, 2016).

5. Un aspect particulièrement critiqué a par exemple été l'absence de toute référence à la nécessaire sortie du charbon à moyen terme, qui figurait pourtant dans la version initiale de la ministre de l'Environnement, et qui a finalement été remplacée par un paragraphe sur la compétitivité et « la nécessité de préserver les centrales à charbon les plus modernes » (WELT, 2016).

les émissions nettes au niveau de 2005⁶. Ce constat est également confirmé par la contribution nationale du Costa Rica pour l'Accord de Paris, qui a par ailleurs révisé les ambitions à la baisse. Ainsi, l'INDC évoque plutôt une diminution des émissions nettes de 12 % entre 2012 et 2021 et de 25 % d'ici 2030 et fixe désormais 2085 comme horizon pour atteindre la neutralité climatique (Gouvernement du Costa Rica, 2015).

Quels leviers pour la neutralité ? En tant que précurseur de la mise en place de systèmes de rémunération des services écosystémiques, la stratégie initiale du Costa Rica était fortement fondée sur le rôle que pourrait jouer la croissance du secteur forestier en tant que puits de carbone (Pratt *et al.*, 2010). Ceci a conduit à une surestimation de la capacité d'absorption des forêts, régulièrement révisée à la baisse au fil des inventaires. De fait, selon l'inventaire d'émissions de 2015, le secteur de l'agriculture et de l'usage des sols est redevenu un émetteur net depuis 2010 (MINAE, 2015). En parallèle, la vision « neutralité » développée depuis 2007 a permis de mettre en place plusieurs initiatives de labélisation des entreprises (programme « C-Neutral », avec près de 100 entreprises certifiées) et actions volontaires, ainsi qu'une réflexion plus large sur le potentiel de réduction des émissions, notamment dans le secteur de la mobilité et la production électrique en forte croissance. Enfin, le « recul » perçu du Costa Rica vis-à-vis de son objectif initial doit également être mis en perspective à l'échelle internationale : avec des émissions par habitant de 2,4 t CO₂eq/ an, le Costa Rica reste bien en dessous de la moyenne européenne (7,7 t/ habitant en 2012).

2.1.3. Suède

Le modèle scandinave de transition énergétique. Précurseur en matière de taxation carbone dès les années 1990 (avec une taxe atteignant plus de 120 euros par tonne de CO₂ aujourd'hui), la Suède fait partie des pays industrialisés les plus avancés en matière de transition bas carbone. Depuis le début des années 1970, la Suède a ainsi opéré sa première transition énergétique avec une division par deux de la consommation de pétrole entre 1970 et 2012, passant d'une part de 77 % à 25 % de la consommation primaire d'énergie, grâce à l'électrification (décarbonée à plus de 90 % grâce à l'hydraulique et au nucléaire) et l'essor

des réseaux de chaleur alimentés par la biomasse (Global Chance, 2014). En matière d'ambition, le pays s'est fixé dès 2008 des objectifs très relevés :

- réduction des émissions de -40 % entre 1990 et 2020 (objectif le plus ambitieux en Europe avec l'Allemagne) ;
- augmenter la part des ENR pour atteindre 50 % de la consommation finale en 2020 ;
- éliminer l'usage de combustibles fossiles pour le chauffage d'ici 2020 ;
- réduire fortement la part des combustibles fossiles dans les transports d'ici 2030.

La neutralité carbone, une aspiration politique affirmée. Dès 2008, la loi suédoise sur une politique intégrée du climat et de l'énergie (loi 2008/09:162) inclut également l'objectif indicatif de long terme suivant « The vision is for Sweden to have a sustainable and resource-efficient energy supply by 2050 with no net emissions of greenhouse gases into the atmosphere ». Et si l'on tient compte de l'apport des puits de carbone, cet objectif a déjà quasiment été atteint en... 2015 : en effet, l'inventaire GES de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) montre que les émissions brutes du pays (54 millions de tCO₂eq en 2015) sont quasi intégralement compensés par l'absorption par les forêts, ne laissant que des émissions nettes résiduelles de 3,2 millions de tCO₂eq.

Vers un projet plus ambitieux de neutralité, le processus d'adoption de la loi climat de 2017. Partant de ce premier cadre stratégique, l'alternance politique de 2014 (arrivée au pouvoir d'une coalition gauche et Verts en remplacement du gouvernement conservateur) a ouvert une nouvelle fenêtre d'opportunité pour renforcer les objectifs. Le Premier ministre Lövin a nommé dès 2015 un groupe de travail regroupant 45 membres (représentant l'industrie, la société civile et les parties politiques) sous la direction du politique Anders Wijkman (centre-droit) pour préparer une nouvelle législation climat. La synthèse de ce travail a donné lieu à un rapport puis à la proposition de loi soumise en mars 2017 et adoptée le 15 juin (entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2018). Fait notable : grâce au processus de dialogue comprenant l'ensemble des parties prenantes et des partis politiques, la loi a été adoptée quasiment à l'unanimité, avec le seul parti d'extrême-droite votant contre. Et la loi apporte des nouveautés substantielles : elle fournit non seulement une base juridique solide pour l'objectif climat de long terme, mais elle prévoit également d'accélérer la trajectoire (atteinte de la neutralité dès 2045) et de renforcer l'ambition, en choisissant de ne

6. Ainsi, l'INDC du Costa Rica indique explicitement : « The goal proposed to achieve Carbon Neutrality by 2021 with total net emissions comparable to total emissions in 2005 » (Gouvernement du Costa Rica, 2015).

pas comptabiliser le secteur AFOLU (Agriculture, Forestry, and Other Land Use) pour l'atteinte de l'objectif. En effet, la loi précise que 85 % des réductions d'émissions devront directement concerner les émissions domestiques, tandis que les 15 % restants pourraient être compensés (si besoin) par des mécanismes de flexibilité et de compensation.

Quels leviers pour la neutralité carbone en Suède ? La loi ne se contente pas de fixer le cap 2045, mais complète également les objectifs sectoriels et intermédiaires pour dessiner une trajectoire de décarbonation plus cohérente. Ainsi, en sus de la décarbonation du secteur électrique et de la chaleur (d'ici 2020), la loi prévoit logiquement de s'attaquer à l'enjeu structurel de la mobilité, en fixant l'objectif de réduire de 70 % les émissions de ce secteur entre 2010 et 2030. Par ailleurs, elle définit un objectif global de 63 % de réduction des émissions GES (hors AFOLU) pour 2030 et -75 % pour 2040. Inspirée par le modèle britannique, la loi prévoit également de renforcer le cadre de gouvernance des politiques climatiques. En premier lieu via la mise en place d'un Conseil d'experts pour la politique climatique, avec un statut d'autorité gouvernementale, pour évaluer la mise en œuvre des politiques et émettre des recommandations pour le gouvernement. En second lieu en obligeant le gouvernement à produire chaque année un rapport d'avancement sur les politiques climatiques. Et enfin, en stipulant que les gouvernements successifs devront présenter un plan d'action national tous les 4 ans, le premier étant attendu pour 2019.

Analyse générale. Bien qu'ayant une situation de départ très avantageuse au regard des progrès déjà réalisés en matière de réduction des émissions et des capacités de séquestration, la Suède a clairement choisi de répondre à l'appel de Paris, démontrant sa volonté de devenir le « premier État-providence libéré des combustibles fossiles ». À travers le choix de ne pas inclure les puits de carbone, la Suède défend la vision d'une réelle décarbonation profonde de l'économie (tout en se laissant quelques marges de manœuvre avec la possibilité d'inclure des mécanismes internationaux concernant jusqu'à 15 % des émissions). La loi climat de 2017 fournit un cadre clair et crédible pour ce nouvel objectif, mais tout reste à faire au niveau de la mise en œuvre : la décarbonation des transports sera clairement le plus grand défi d'ici 2030, et pour l'instant peu de signaux indiquent que la Suède y parviendra plus facilement que d'autres pays, la taxe carbone n'ayant qu'un effet limité sur ce secteur, exigeant une réelle politique volontariste à venir.

2.1.4. Finlande

La situation énergétique de la Finlande. En raison de l'importance du secteur industriel et d'un climat particulièrement froid, la Finlande affiche une consommation finale d'énergie par habitant deux fois plus élevée que la moyenne européenne (4,5 TEP contre 2,2 TEP en 2016). En parallèle, le pays dispose d'importantes ressources d'énergies renouvelables, notamment de biomasse et d'hydraulique. Grâce au développement de la biomasse énergie, le pays a atteint son objectif 2020 dès 2014, avec une part renouvelable de 39 % de la consommation finale brute (dont 52 % dans le secteur de la chaleur). Au-delà de son importance pour le secteur industriel et la production d'énergie, l'importante couverture forestière assure également un rôle croissant de puits de carbone : selon l'inventaire GES soumis à la CCNUCC, l'absorption d'émissions par le secteur forestier a doublé entre 1990 et 2015, avec une réduction des émissions nettes de 50 %. Néanmoins, ces dernières années, un débat politique croissant émerge sur la possible surexploitation des ressources forestières et ses conséquences à moyen et long termes.

La politique énergétique. La Finlande affiche une politique énergie-climat ambitieuse, essentiellement fondée sur le potentiel biomasse du pays. Les objectifs pour 2020 dans le cadre du paquet énergie-climat européen sont :

- la réduction des émissions de 21 % (objectif européen secteur ETS) et 16 % non-ETS ;
- l'augmentation de la part des ENR à 38 % de la consommation finale (objectif atteint dès 2014 ; la stratégie nationale prévoit 50 % pour 2020) ;
- une politique plus volontariste sur les ENR dans les transports : objectif de 20 % en 2020 (10 % au niveau européen) ;
- une sortie du charbon et la division par 2 des importations de pétrole au cours des années 2020 ;
- un objectif de 40 % d'énergies renouvelables dans les transports a été défini pour 2030.

En 2015, la Finlande a adopté sa loi climat. Celle-ci définit un objectif de décarbonation de long terme en ligne avec les orientations européennes : 80 à 95 % d'ici 2050. Elle renforce également le cadre de gouvernance avec l'obligation de publier un rapport d'avancement sur l'état des politiques climatiques chaque année. Un groupe d'experts sur le climat a été institué en 2011. Néanmoins, la stratégie de long terme reste encore incertaine en l'absence d'une trajectoire et d'objectifs intermédiaires précis. La feuille de route climat 2050 publiée en 2014 évalue ainsi 4 trajectoires possibles de décarbonation, mais ne donne pas d'orientations ni de mesures plus spécifiques.

L'objectif de neutralité carbone. À la suite des annonces faites par la Suède en février 2017, le ministre de l'Énergie finlandais a évoqué une ambition similaire de neutralité en 2045, avec l'idée d'un leadership des pays scandinaves (Yle, 2017). Néanmoins, il s'agit pour l'instant d'une simple déclaration non suivie d'effets. Contrairement à la Suède, l'annonce finlandaise inclut explicitement la séquestration par les puits naturels pour atteindre l'objectif de neutralité : « In Finland this balance can be reached sooner, in 2045 at the latest. This is when our forests would sequester all the fossil emissions generated in Finland. In the international context this would place Finland among the highly ambitious countries. » À noter que déjà avant l'annonce de 2017, les 6 plus grandes villes finlandaises ont formé le « towns leaders' climate network » autour de l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Parallèlement, un grand projet de recherche a élaboré plusieurs scénarios sur la neutralité carbone en Finlande (www.neocarbonenergy.fi).

Analyse. Il reste pour l'instant difficile à prévoir si l'annonce politique va produire des effets concrets en Finlande. Le recours accru à la ressource forestière pour la biomasse énergie et la production industrielle induit une pression nouvelle qui pourrait conduire à fortement affaiblir le potentiel d'absorption naturelle des émissions de GES, qui pourrait être divisé par deux d'ici 2030 (Hassi, 2017 ; MEAE, 2017, p. 82). Par ailleurs, anticipant le risque d'être pénalisé par la révision en cours des règles d'inclusion du secteur UCTF dans les objectifs climat européens, la Finlande s'est fortement engagée (aux côtés de la France notamment) en faveur d'une comptabilité moins stricte, remportant finalement une règle exceptionnelle pour compenser 10 millions de tCO₂eq d'ici 2030 (Conseil européen, 2017).

2.1.5. Irlande

La politique énergie-climat en Irlande. L'Irlande a le deuxième PIB par habitant le plus élevé dans l'Union européenne après le Luxembourg. En matière d'émissions, le pays est également largement au-dessus de la moyenne avec 13,5 tCO₂eq/habitant (contre 8,7 tCO₂eq pour l'UE), enregistrant une légère augmentation (7 %) des émissions nationales entre 1990 et 2015. Le secteur agricole compte à lui seul pour 35 % des émissions totales de GES. Dans le cadre du paquet énergie-climat européen, le pays s'est fixé les objectifs suivants :

- une réduction de 20 % des émissions de GES (hors secteur ETS) par rapport à 1990 ;

- augmenter la part des énergies renouvelables à 16 % de la consommation finale brute (8 % en 2014) et à 40 % dans la production d'électricité ;
- réduire la consommation finale d'énergie de 20 % par rapport à la moyenne 2000-2005.

En dépit d'une première stratégie climat ambitieuse dès 2000 (prévoyant la fermeture de la centrale à charbon la plus émettrice du pays, la mise en place d'une taxe carbone et un programme d'efficacité énergétique), l'Irlande n'a affiché que des progrès modestes depuis (Torney, 2017). En effet, le dernier bilan de 2017 estime qu'avec les mesures actuelles, la baisse des émissions de GES n'atteindrait que 4 à 6 % d'ici 2020, nettement en recul par rapport à l'objectif fixé (DCCA, 2017).

L'émergence d'un débat sur la neutralité carbone. Dans le processus d'élaboration d'une loi nationale sur le climat, le gouvernement a fait dès 2013 une annonce sur l'objectif d'atteindre la neutralité carbone dans le secteur de l'agriculture et de l'usage des sols d'ici 2050, en lien avec l'objectif d'une réduction d'au moins 80 % des émissions de GES pour l'ensemble de l'économie (DCCA, 2014). En lien avec ces objectifs, le « Climate action and low carbon development act » a finalement été adoptée en 2015 et inclut également des dispositions pour renforcer la gouvernance des politiques climatiques (création d'un Climate Change Advisory Council, révision du plan d'action tous les 5 ans).

Analyse. L'objectif de neutralité carbone formulé par l'Irlande est intéressant dans la mesure où c'est le seul cas où cet objectif a été défini sur une base sectorielle. Le focus sur l'agriculture et l'usage des sols semble pertinent dans le contexte national, où ce secteur est le premier émetteur de GES. Néanmoins, la mise en œuvre de cet objectif reste problématique : dans le cadre de l'abandon des quotas sous la politique agricole commune, l'Irlande prévoit un important développement de son agriculture (essentiellement basée sur l'élevage bovin et laitier). Ainsi, tout en passant en revue différentes mesures envisageables, les rapports disponibles évoquent au mieux une légère baisse des émissions du secteur (-25 %) d'ici 2050 et conseillent plutôt de considérer l'objectif de la neutralité davantage « comme un horizon pour l'action publique que comme un objectif contraignant » (Teagasc, 2013).

2.1.6. Royaume-Uni

La politique énergie-climat. Le Royaume-Uni s'est attaché à devenir un leader international en matière de lutte contre le changement climatique,

ambition consacrée par l'adoption de son Climate Change Act en 2008. Véritable modèle ayant inspiré de nombreux pays à travers le monde (dont la France), cette loi a mis en place un cadre de gouvernance robuste, fondé sur l'élaboration de budgets carbone sectoriels et contraignants (sur au moins 3 périodes successives de 5 ans pour garantir la visibilité), de plans d'actions associés et d'un rôle central pour l'évaluation indépendante à travers le Committee on Climate Change (CCC). En dépit d'une période marquée par un relatif désengagement des politiques climatiques à partir de 2015 (suppression du Green Deal pour la rénovation énergétique, forte réduction des mécanismes de soutien aux ENR), les derniers bilans montrent des résultats plutôt encourageants. Les émissions de GES ont baissé de 36 % entre 1990 et 2016, avec une réduction de l'usage de charbon de 50 % entre 2015 et 2016 (Evans, 2017).

L'émergence du débat politique sur la neutralité. Conformément aux engagements européens, l'objectif 2050 inscrit dans le Climate Change Act est celui d'une réduction des émissions de GES d'au moins 80 % d'ici 2050. C'est également sur la base de cet objectif que le CCC a élaboré les trajectoires de long terme définissant les budgets carbone⁷. Néanmoins, l'adoption de l'Accord de Paris en décembre 2015 a été le catalyseur d'un nouveau débat sur un possible renforcement de l'objectif de décarbonation du Royaume-Uni, à travers une campagne menée par l'ex-ministre de l'Environnement et leader de l'opposition Ed Miliband (Boffey, 2015). En mars 2016, le gouvernement britannique s'est positionné en annonçant que l'objectif de neutralité devait être inscrit légalement et sur une base contraignante, indiquant que la question n'était pas « de le faire, mais comment le faire » (Vaughan, 2016). À l'inverse, le CCC a depuis recommandé de ne pas modifier l'objectif long terme pour l'instant, indiquant que la priorité devait être à la mise en œuvre sur le court et moyen termes face au risque réel de ne pas atteindre les objectifs fixés d'ici 2032 et qu'un effort supplémentaire était nécessaire pour développer toutes les options de séquestration des émissions résiduelles à long terme (UK CCC, 2016). En parallèle, on peut noter que l'agenda pour la neutralité carbone continue à être porté dans le débat politique, comme en témoigne la publication d'une analyse de trajectoire zéro carbone (commandée par le parti des libéraux-démocrates) en septembre 2017,

ainsi que la publication d'un nouveau rapport par l'initiative Zero Carbon Britain (CAT, 2017 ; Culmar & Iken Associates, 2017), ainsi qu'une analyse scientifique des implications d'un scénario « neutralité carbone 2050 » pour la stratégie nationale (Pye *et al.*, 2017). En termes de leviers, ces études mobilisent l'ensemble des options de réduction d'émissions sectorielles (bâtiment, chaleur, électricité, transports, agriculture et UCTF) et attribuent un rôle central aux technologies CSC pour la décarbonation de l'industrie et pour atteindre des émissions négatives pour la production de biomasse-énergie (BECCS). Néanmoins, contrairement à la France par exemple, le rôle central de la maîtrise de la demande énergétique (sobriété et efficacité) reste relativement peu abordé dans ces études. En octobre 2017, la stratégie de croissance propre proposée par le gouvernement ne fait pas mention de la neutralité carbone.

2.1.7. Nouvelle-Zélande

Politique énergie-climat. Avec des émissions de 17 t CO₂eq par habitant en 2015 (hors UCTF), la Nouvelle-Zélande se situe actuellement bien au-dessus de la moyenne de l'OCDE (12 t CO₂eq). Au total, les émissions nationales nettes de GES ont augmenté de 64 % entre 1990 et 2015. Ceci est notamment dû à l'importance de l'agriculture (50 % des émissions de GES hors UCTF) et à la faible densité de population (17 habitants par km²), et des besoins de mobilité associés ainsi qu'à la demande croissante de l'industrie (43 % de la consommation finale d'énergie). Parallèlement, les capacités d'absorption nette des forêts ont considérablement baissé depuis 1990 (-21 %) bien qu'elles représentent toujours près de 30 % des émissions brutes de GES en 2015 (Gouvernement de la Nouvelle-Zélande, 2017). En matière de politique énergétique, il est à noter que le système électrique néo-zélandais est déjà renouvelable à plus de 80 %, avec l'objectif d'atteindre 90 % en 2025, et que le pays a été précurseur dans la mise en place d'un système national d'échanges de quotas CO₂, couvrant l'ensemble des secteurs en dehors de l'agriculture (IEA, 2017). Dans le cadre de l'Accord de Paris, le pays a énoncé l'objectif de réduire les émissions nationales de GES de 30 % d'ici 2030 et de 50 % d'ici 2050 par rapport à 2005.

Vers la neutralité carbone. La première annonce sur la volonté nationale de devenir neutre en carbone date de 2007, lorsque le gouvernement s'était engagé à entamer une démarche d'exemplarité pour atteindre un service public neutre pour le climat dès 2021, sachant que le service public représente environ 2 % des émissions nettes. Cet

7. On peut néanmoins noter que les analyses du CCC incluent depuis le début un scénario « Max », équivalent à une réduction globale des émissions de GES de 90 % d'ici 2050.

objectif a néanmoins été abandonné après les élections de 2009 (Birchall, 2014). Plus récemment, en 2016, l'ONG Generation zero a lancé une vaste campagne en faveur de l'adoption d'une nouvelle loi sur la neutralité carbone, inspiré par le modèle du Climate Change Act britannique⁸. Cette mobilisation a également suscité une nouvelle prise de conscience dans le monde politique, avec la constitution d'un groupe de 35 élus multi-partis (Globe NZ) engagés pour une politique climatique plus ambitieuse. Cette initiative a donné lieu en 2017 à la publication d'une étude présentant différentes trajectoires de décarbonation profonde pour le pays (VividEconomics, 2017). Celle-ci est intéressante dans la mesure où elle se focalise en premier lieu sur l'atteinte de la neutralité pour les GES à durée de vie longue (CO₂ et N₂O), tout en laissant plus de flexibilité pour les GES à durée de vie plus courte (méthane notamment), afin d'atteindre une réduction globale des GES de jusqu'à 80 % en 2050. Par ailleurs, en lien avec l'importance du secteur agricole et forestier, elle illustre l'importance des stratégies futures d'usage des sols pour la décarbonation du pays.

Vers un objectif politique de neutralité ? À la suite des élections nationales de septembre 2017, l'alternance politique a vu le retour d'un gouvernement contrôlé par le parti des travaillistes (Labour). Faisant suite à l'engagement politique des initiatives de Globe NZ et Zero Carbon Act, la nouvelle Première ministre Jacinda Ardern a annoncé en octobre 2017 qu'une loi sur la neutralité carbone devrait être adoptée prochainement, en reprenant le dispositif des budgets carbone britanniques (Mathiesen, 2017).

Analyse. Il est bien trop tôt pour évaluer la portée de l'annonce faite par la Première ministre néo-zélandaise. Néanmoins, le cas du pays est atypique quant à la vitesse à laquelle le débat de la neutralité a pris de l'ampleur après l'Accord de Paris pour (potentiellement) se traduire dans un engagement politique. Et ce revirement semble d'autant plus impressionnant que les engagements du pays étaient relativement modestes jusque-là. Néanmoins, les études existantes illustrent la difficulté à décarboner le pays en raison de ses caractéristiques spécifiques, à commencer par l'importance du secteur agricole, l'incertitude sur la gestion des espaces forestiers et la décarbonation de l'énergie en dehors du secteur électrique, sans oublier les intérêts nationaux liés à l'exploitation de ressources fossiles (gaz notamment).

8. Plus d'informations sur le site de l'association : <http://zerocarbonact.nz/#explore>

2.2. Enseignements et questionnements

Plusieurs enseignements et questionnements peuvent être tirés de l'analyse des stratégies nationales synthétisées ci-dessus.

(i) D'abord, l'**efficacité de l'attracteur « neutralité carbone »** promulgué par l'Accord de Paris apparaît clairement, soit dans les stratégies promulguées après 2015, soit dans les annonces et débats. L'analyse de l'émergence de la neutralité carbone dans un nombre de plus en plus important de stratégies d'engagement nationales démontre l'impact de l'Accord de Paris sur la promotion de cet « attracteur » (même si de nombreux objectifs avaient déjà été évoqués dans des politiques précédentes par les pays ayant pris des engagements liés à l'objectif de neutralité carbone).

(ii) La revue de ces initiatives permet également de dégager des éléments intéressants sur les **processus politiques** permettant de mettre à l'agenda ou d'aller plus loin dans les politiques liées à la neutralité carbone (importance du rôle des parlements ou commissions parlementaires demandant des rapports sur le sujet de la neutralité carbone – cas de la Nouvelle-Zélande, par exemple), ou dans le travail de recherche et de préparation réalisé en amont par des institutions de recherche indépendantes ou des acteurs de la société civile par exemple (cas du Royaume-Uni).

(iii) La perspective de la neutralité oblige évidemment les pays qui ont commencé l'exercice à explorer les technologies dites « de rupture ». Mais elle les pousse aussi à reconsidérer des options technologiques parfois sous-estimées, ou volontairement exclues jusqu'ici. Par exemple, même si le CSC semble surtout envisagé pour la décarbonation de l'énergie, des pistes sont recherchées pour son utilisation dans l'industrie lourde, voire pour fournir des émissions négatives (e.g., BECCS). Inversement, la neutralité bénéficie aussi d'un contexte où des ruptures semblent possibles plus rapidement qu'envisagé il y a encore quelques années, sous d'autres contraintes.

(iv) Dans certains cas, l'amorce de débats sur la neutralité carbone semble avoir permis d'engager une **discussion sur de nouvelles actions et de nouvelles thématiques**, plus ambitieuses ou autrefois taboues, impliquées par la neutralité. Les stratégies de décarbonation font encore la part belle aux solutions technologiques, et peu d'attention est généralement octroyée aux changements structurels de l'activité économique, comme, par exemple, le fait que les économies s'achèment vers un modèle basé sur les services, ou le fait que l'automatisation et les innovations en matière de production industrielle telles que l'impression 3D

auront vraisemblablement des effets sur la localisation des productions, faisant apparaître la nécessité de se poser la question de la décorrélation de la demande de fret routier de la croissance économique à long terme. Certains plans d'actions commencent cependant à considérer l'interface entre les questions de **neutralité carbone et l'évolution des modes de vie** ou des **modèles économiques** (qui s'éloigneraient ainsi d'une simple prolongation de tendances connues). Ainsi, une version antérieure du Klimaschutzplan mentionnait la possibilité d'aller plus loin dans la réduction des émissions agricoles en adoptant des changements de comportement de la part des consommateurs, par exemple en réduisant la consommation de viande rouge. Les scénarios néo-zélandais proposés par VividEconomics, de même, font l'hypothèse d'une réduction de la production de viande de bœuf et de mouton. Le plan d'action allemand met également l'accent sur le changement d'utilisation des routes au profit des transports ferroviaires, de la marche et du vélo. Une solution actuellement évoquée par de nombreuses discussions portant sur la réalisation d'objectifs ambitieux à 2050 consiste en l'augmentation du coût du fret routier, altérant l'incitation pour les acteurs économiques à demander des biens nécessitant des chaînes de valeur « intensives en transport ». Les changements de la demande et la régulation de celle-ci apparaissent ainsi comme des thématiques phares des plans de décarbonation ambitieux (voir Section 3).

(v) L'analyse des stratégies énoncées par les États pose des questions sur le **périmètre de la comptabilité carbone** utilisée. L'article 4.1. de l'Accord de Paris invite bien à égaliser les émissions anthropiques et la séquestration, donc l'ensemble des émissions. À l'inverse, les CDN renvoient vers une logique de responsabilité des émissions domestiques, et donc potentiellement un risque de fuites, ou pour le moins un effet d'optique, de progrès vers la décarbonation de certains pays et au contraire d'intensité carbone croissante pour d'autres (pas nécessairement volontaire, mais qui accompagne une spécialisation de certains pays en développement vers la production des matériaux intensifs en énergie dans les premières phases de développement), et donc une sous-estimation du problème ou des tensions politiques. De plus, les émissions de soutes (liées aux transports internationaux) ne sont pas prises en charge et représentent potentiellement à elles seules plus que le potentiel de séquestration naturel. Si, aujourd'hui, la plupart des pays s'en tiennent encore au décompte des émissions nationales, certains ont entamé une réflexion sur les émissions liées aux vols internationaux (Klimaschutzplan) ou sur les importations de biens de consommation.

(vi) À l'exception de la Suède, où l'ambition semble encore renforcée par rapport aux engagements précédents, l'essentiel des autres annonces consistent surtout en une prolongation d'objectifs existants, avec par exemple l'ajout de l'exploration de nouvelles voies technologiques.

(vii) Séquestration et émissions négatives domestiques : la première stratégie de compensation des émissions résiduelles se trouve dans les puits domestiques et les émissions négatives domestiques. En rapport avec le périmètre de la comptabilité carbone, l'analyse des stratégies des États mène à des enseignements significatifs sur la **désirabilité/non désirabilité de certaines stratégies de compensation domestique des émissions par développement des options de séquestration résiduelles**. L'évaluation des potentiels de puits de carbone et les stratégies permettant de maximiser ces potentiels aux moments souhaités apparaît dès lors comme une première étape indispensable à la construction d'une stratégie de neutralité carbone. Des pays tels que la Finlande, le Costa Rica, la Nouvelle Zélande ou l'Allemagne ont commencé à identifier des potentiels spécifiques de puits de carbone (aires forestières nationales), et à imaginer des stratégies plus robustes de protection et de gestion des forêts, des prairies permanentes et des zones humides. Ces stratégies incluent également la limitation de l'artificialisation des terres.

(viii) L'analyse des stratégies de neutralité carbone met ainsi en lumière la **nécessité de prendre avec précaution les hypothèses de progrès technologiques énoncées**. Si certains scénarios s'avancent prudemment (VividEconomics propose ainsi deux scénarios : l'un faisant l'hypothèse d'un développement rapide des technologies permettant de réduire les émissions de GES, l'autre faisant l'hypothèse d'un développement plus lent de ces technologies et proposant des stratégies de réduction alternatives), d'autres semblent mettre au même plan des technologies matures et non matures (y compris du point de vue commercial), comme les énergies renouvelables et le CSC, des technologies ayant des possibilités de mise en œuvre différentes du fait de la structuration des acteurs en place (mise en place du semis sous couvert végétal plus « simple » à mettre en place que la diminution de l'apport d'azote qui nécessite la mise en place de rotations et donc de chaînes en aval demandeuses des produits issus des rotations) et des technologies ayant des niveaux de désirabilité différents (CSC pour la production d'électricité peu souhaitable car existence de stratégies alternatives pour décarboner le secteur de la production électrique comme les énergies renouvelables ; versus CSC pour la production d'acier qui reste un secteur difficile à décarboner).

(ix) L'accent mis sur ces développements (puits de carbone, biomasse pour émissions négatives, etc.), mais également les pistes mobilisées pour la décarbonation, amènent à poser la question de la compatibilité de ces stratégies avec les **questions d'adaptation**, et plus généralement de préservation de la biodiversité et de résilience des milieux naturels : ces points sont peu abordés dans les plans nationaux étudiés.

3. STRATÉGIES NATIONALES CADRÉES PAR L'OBJECTIF DE NEUTRALITÉ CARBONE – POINTS D'ATTENTION ET RECOMMANDATIONS

3.1. La neutralité, un attracteur politique

Si l'objectif de neutralité carbone globale s'appuie sur le diagnostic de la communauté scientifique, il ne constitue pourtant pas en lui-même une réponse au défi que le changement climatique pose à l'humanité, et aux objectifs qu'elle s'est donnés. Le concept de « neutralité » (égalisation des émissions et des retraits de gaz à effet de serre de l'atmosphère) pourrait donner l'illusion, scientifiquement erronée, d'un état d'harmonie à atteindre pour retrouver l'équilibre perdu du système climatique. On le sait, la réalité est différente, l'équilibre dynamique, et maintenir le réchauffement climatique « bien en deçà de 2°C » et tendre vers 1.5°C nécessitera certainement, compte tenu du niveau actuel d'émissions et des tendances prévisibles des toutes prochaines décennies (même dans l'hypothèse d'un renforcement de l'ambition affichée à Paris), que le bilan s'inverse et devienne négatif d'ici la fin du XXI^e siècle (plus de séquestration que d'émissions). Il ne s'agit donc pas simplement de trouver des solutions pour « compenser » nos émissions et arriver à un équilibre entre émissions et capture : il s'agit d'amener le bilan global vers un état de « puit net », condition absolue d'une stabilisation du climat en accord avec l'objectif de Paris. La « neutralité » n'est qu'un point de passage, d'un état éphémère du système.

Pourtant, depuis la formulation explicite de cet objectif collectif dans l'Accord de Paris, de nombreux États, entités politiques infranationales (villes, régions, États), entreprises et ONG ont repris le concept à leur compte comme nouvel étendard de leur ambition climatique. C'est de ce point de vue un premier succès, qui démontre que ce concept, en apparence un peu flou, peut mobiliser, communiquer, diffuser une ambition renouvelée au sein de la société. Cela tient peut-être

justement à l'ambiguïté du concept et à l'idée apaisante d'équilibre qu'il projette ; cela tient peut-être aussi à la radicalité (au moins apparente) qu'il revendique. Cela tient certainement encore au fait que, contrairement à des objectifs quantifiés de réduction tels que formulés jusqu'ici dans la négociation post-Kyoto, la « neutralité » s'incarne aisément dans des objectifs plus sectoriels et communicants : pour traduire sectoriellement un objectif de réduction de 40 % des émissions européennes par exemple, il faut s'appuyer sur une expertise complexe, engager des débats sur les priorités, pour aboutir à des « feuilles de route » controversées comme le Paquet énergie-climat 2020. Par opposition, on voit que les acteurs s'emparent facilement du concept de neutralité pour le traduire dans des mots d'ordre très politiques, simples (simplistes ?) mais efficaces comme « la fin des fossiles », ou « la fin du diesel en ville », ou le « 100 % renouvelables », même si, chaque fois, ces propositions ne sont pas équivalentes, ni consensuelles, ni évidemment suffisantes. En ce sens, il peut représenter une force de rappel politique importante pour l'Accord de Paris, construit autour d'une tension explicite entre l'objectif ultime et la réalité des contributions à ce jour sur la table.

On peut sur ce point tirer des enseignements majeurs des projets Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP)⁹ et Modelling and Informing Low Emission Strategies (MILES)¹⁰ menés en parallèle à la négociation de l'Accord de Paris. Les exercices de construction de trajectoires de décarbonation profondes multi-pays (DDPP, 2015) ne visaient pas explicitement un objectif de neutralité, mais proposaient à l'horizon 2050 un attracteur autour de 1.5 tCO₂/hab brut pour le seul système énergétique et industriel, que l'on peut considérer comme largement « compatible » avec l'objectif global de neutralité. Ces travaux servaient de référence pour analyser la portée des contributions intentionnelles déterminées nationalement (CIDN) dans le projet MILES (analyse des CIDN ; Spencer *et al.*, 2015). Menées sur la presque totalité des membres du G20, ces analyses ont révélé qu'on ne pouvait pas se confronter analytiquement à un niveau d'exigence aussi radical sans accepter une discipline forte sur les trajectoires de transformation sectorielles dès aujourd'hui : l'objectif de 2050 n'est pas un horizon abstrait, il s'impose sur nos choix de court et moyen termes.

9. Deep Decarbonization Pathways Project, voir : <http://deepdecarbonization.org/>

10. Modelling and Informing Low Emission Strategies, voir : <https://www.iddri.org/fr/projet/modeliser-et-informer-les-strategies-bas-carbone>

C'est bien évidemment la stratégie qui a conduit à introduire la formulation de stratégies de long terme dans l'Accord de Paris. Leur rôle est d'inviter chaque État à mener cette réflexion et à en tirer les conclusions sur la réévaluation de sa contribution. L'objectif de neutralité fournit évidemment un horizon pour ces exercices, même si cela suppose d'effectuer un changement d'échelle du global au national, que nous discuterons plus loin. Mais au-delà du travail analytique, il semble, au vu des annonces faites depuis décembre 2015, que le concept de neutralité carbone soit en mesure de fournir un attracteur politique collectif, un référentiel commun, autour duquel l'ensemble des acteurs réunis autour de l'accord (et pas seulement les États) pourront construire leur propre stratégie, et discuter et questionner celle des autres.

Pour que ce crédit politique se maintienne et se renforce, il sera toutefois crucial que l'usage du concept, la « pratique de la neutralité », ne vienne pas brouiller les pistes en abusant du caractère communicant du concept, sans engager le travail d'exploration, de remise en question des approches actuelles, et de formulation de stratégies nouvelles que la radicalité du concept exige. On peut de ce point de vue être inquiet au vu de certaines annonces qui, nous l'avons décrit dans la section 2, ressemblent plus à une retranscription d'objectifs existants (et difficilement compatibles avec l'idée de neutralité) qu'à un programme radical, poussant parfois un peu ici les curseurs de transformations déjà anticipées, ou s'appuyant là sur des équilibres comptables un peu vagues pour compenser des niveaux d'émissions encore élevés. Mais, fort heureusement, d'autres initiatives semblent vouloir éviter cet écueil en **utilisant le concept de neutralité comme un moyen tout autant qu'une fin**.

Cadrer l'élaboration de stratégies nationales par l'objectif de neutralité carbone ne pourra pourtant pas se résumer à faire « un peu plus, toutes choses égales par ailleurs », mais requiert au contraire de repenser en profondeur l'approche de différents aspects dans la construction des scénarios :

- **le champ des politiques**, car force est de reconnaître que la question énergétique, essentielle, a souvent monopolisé l'attention au détriment des sujets liés aux usages des sols, à notre modèle alimentaire et agricole, etc., alors même que ces domaines deviennent essentiels à prendre en compte dès lors que la neutralité est abordée et nécessite d'étudier avec attention la question des puits ;
- **la nature des transformations** à considérer, pour ouvrir des possibilités de réductions d'émissions qui pouvaient être négligées avec des objectifs moins ambitieux et s'assurer des

conditions de leur mise en cohérence avec les objectifs de développement du pays ;

- **le temps**, pour intégrer les transformations à 2050 (qui resteront la temporalité pertinente pour la planification stratégique) dans leur contexte de plus long terme (qui correspond à la temporalité de la neutralité carbone conforme à l'Accord de Paris) ;
- **l'espace**, pour positionner les transformations à l'échelle nationale (qui est l'échelle de la planification stratégique) dans leur contexte global (qui est l'échelle à laquelle la neutralité carbone est définie).

Repenser l'approche à l'aune de la neutralité implique ainsi de relever l'ambition et d'élargir le champ des analyses, sans quoi les risques de perte de confiance et de crédibilité de l'action publique sur le climat seraient grands. Cette évolution nécessite de reconsidérer avec attention les fondements méthodologiques (périmètre et comptabilité), d'envisager les solutions techniques mais aussi les évolutions sociétales possibles, et enfin, compte tenu de l'ampleur, du champ et de la nature des transformations profondes impliquées par l'atteinte de la neutralité, de revisiter les processus d'élaboration et de mise en œuvre des scénarios. Ces différentes pistes et recommandations sont détaillées dans les sections suivantes. Elles peuvent s'appliquer à tous les pays qui considèrent la neutralité carbone comme horizon politique, et son appliquées plus particulièrement au cas français (voir section 3.4).

3.2. Redéfinir le cadre d'engagement : objectifs politiques, périmètres, comptabilité

3.2.1. Rechercher explicitement à tendre vers une quasi-neutralité domestique à l'horizon 2050

L'équation de la neutralité est simple en théorie : elle consiste, globalement, à égaliser les émissions anthropiques et les retraits de gaz à effet de serre de l'atmosphère, que ce soit par la maximisation du rôle des puits biologiques ou la mobilisation de puits « technologiques » permettant de capter dans l'atmosphère, puis de stocker (dans le sol, dans des matériaux, etc.) le carbone capté. Dans la mesure où la captation concerne presque exclusivement le CO₂, et où les émissions ultimes seront essentiellement composées de CH₄ et de N₂O, il sera nécessaire de préciser les volumes de CO₂ réellement mobilisés pour les scénarios 2°C ou 1.5°C (au-delà d'une simple approximation par les PRG).

Mais la question est évidemment plus complexe lorsque l'on prétend raisonner la neutralité à l'échelle d'un territoire. Si, dans un premier temps, nous limitons la réflexion à l'échelle du pays, est-il légitime de rechercher une neutralité « territoriale » ? Depuis le protocole de Kyoto, et plus largement le développement d'approches basées sur la notion de réductions (par rapport à un budget donné, ou par rapport à une baseline), le principe de la compensation s'est développé. Celui-ci se fonde sur le caractère de globalité des émissions de GES pour proposer d'échanger une réduction supplémentaire ici et une émission additionnelle ailleurs.

L'Accord de Paris bouleverse cette approche à deux niveaux :

a) Politique. La force nouvelle de l'Accord de Paris, c'est son universalité, née de la reconnaissance par chaque Partie de l'objectif collectif et de sa propre responsabilité (au sens d'engagement) à mettre en œuvre chez elle les mesures nécessaires pour assurer sa contribution à l'atteinte de l'objectif global. Peu importe l'ambition effective des contributions actuelles ou à venir, ce qui ressort aujourd'hui plus clairement que jamais est que les pays – et avant tout les pays en développement, précédemment sources d'émissions évitées – souhaitent s'afficher politiquement, communiquer, évaluer la transformation de leurs économies sur la base de leur bilan réel. En produisant leurs contributions déterminées au niveau national (CDN), en écrivant demain leurs stratégies de long terme (et on le voit déjà dans les quelques stratégies étudiées dans la Section 2), ces pays revendiqueront légitimement les émissions et les puits domestiques au titre de leur participation. Ce changement de perspective est déjà explicitement présent dans certaines CDN, qui n'opèrent pas de liens entre de possibles soutiens financiers et la réalisation d'un bilan comptable déduisant les réductions d'émissions rendues possibles par ce soutien. Il est raisonnable de penser que cette approche politique va progressivement dominer. Symétriquement, bien sûr, les pays dits « Annexe I » continuent dans les mêmes documents à revendiquer un recours non négligeable aux offsets (« compensation ») comme partie intégrante de leur offre politique de neutralité. Plusieurs des annonces étudiées dans la Section 2 réaffirment le rôle leader des pays développés et argumentent ainsi le choix d'une date avancée (2050) pour leur stratégie de neutralité.

Mais le recours massif à la compensation pour certaines de ces trajectoires, qui compense des émissions encore élevées (et peu différentes des trajectoires jusqu'ici envisagées) dans certains secteurs, apparaît d'autant plus contradictoire qu'il repousse, de fait, l'atteinte de la neutralité globale

bien au-delà de l'horizon prévu par Paris : si les pays les plus dotés, et les plus technologiques, n'ont pas commencé à développer à l'échelle des solutions décarbonées sur des secteurs importants mais difficiles, la compensation ne pourrait venir que de la mise en œuvre de solutions de réduction « aisées » et peu coûteuses ailleurs (sur le modèle du mécanisme de développement propre, MDP), soit de l'achat de puits. Cela suppose implicitement un « retard » des pays tiers, et donc globalement un monde encore loin de la neutralité. On comprend que cette situation n'est pas tenable, pour deux raisons :

- Elle peut poser un problème de comptabilité puisque, nous l'avons dit, des pays en voie de développement sérieux dans leur engagement de Paris souhaiteront certainement présenter un bilan « réel » de leurs émissions, sans y ajouter les compensations. On peut toujours éviter les doubles comptes par des règles adaptées (sur le modèle de la mise en œuvre conjointe), mais contrairement au MDP (par lequel les pays en développement n'avaient pas l'ambition de revendiquer leur bilan d'émissions domestiques, car non tenus à des réductions d'émissions domestiques sous Kyoto), ceci risque de se traduire par un assèchement du marché.
- Elle pose avant tout un problème politique : si de telles règles sont adoptées, quelle serait l'ambiance d'une COP où les pays développés se féliciteraient d'avoir atteint la neutralité (avec beaucoup de compensation), pendant que des pays en développement seraient mis à l'index, puisque leurs bilans comptables, compte tenu des compensations vendues, afficheraient artificiellement des émissions élevées quand les bilans territoriaux réels ne seraient peut-être pas plus éloignés de la neutralité que ceux des pays industrialisés ? Ceci serait totalement contradictoire avec l'esprit de Paris, la logique des CDN et de leur appropriation politique par les États.

b) Stratégique. En passant d'une logique de l'effort et du coût comparé à une logique d'engagement politique, on a nécessairement modifié le cadre de pertinence des échanges sur les marchés carbone. Le marché garde tout son sens comme instrument économique sur les droits, mais les émissions (positives ou négatives) sont comptabilisées et revendiquées là où elles interviennent. Bien sûr, cette approche trouve ses limites et devra composer avec la réalité. Des pays peu denses et forestiers peuvent à bon compte revendiquer une neutralité sans grande ambition. Dans le même temps, de tels pays ne sont que bien rarement prescripteurs des paradigmes technologiques ou des modes de production et de consommation, et on peut parier

qu'ils adopteront mimétiquement l'essentiel des nouveautés qui se développeront chez leurs voisins : quels sens y aurait-il à rouler en diesel quand le monde entier le ferait à l'électricité ou à l'hydrogène ? Qui produirait les voitures ? Face à ces pays potentiellement sur-dotés en puits, on peut aussi envisager que les spécialisations (notamment agricoles, parfois industrielles) légitiment un bilan déséquilibré lorsque le pays est essentiellement exportateur. On peut aussi imaginer que, par exemple pour des raisons géologiques, certains pays présentent des avantages comparatifs réels si l'on souhaite développer du stockage profond. Dans un monde de neutralité, il y a place pour la compensation transfrontière. Elle ne sera peut-être pas négligeable pour certains pays en regard des bilans futurs de quasi-neutralité, mais représentera un volume nécessairement très réduit à l'échelle de nos bilans d'émissions actuels.

En cherchant en premier ressort à atteindre une neutralité territoriale, il faut compter tout d'abord avec les contraintes que l'on peut anticiper sur les puits biologiques, en premier lieu autour des forêts et des sols en France.

Aujourd'hui, la forêt française encore jeune capte un peu moins d'une tonne de CO₂ par habitant (en net), mais cette capacité devrait fortement se réduire au-delà de 2050, d'un facteur 3 à 4. Ainsi, paradoxalement, la poursuite de la neutralité pourrait se révéler bien plus complexe au-delà de l'horizon 2050 qu'avant ! Il faut noter que ceci nous place dans une situation plutôt confortable, mais pas extravagante, à l'échelle internationale puisque la moyenne globale de potentiel forestier de stockage carbone est de 40 % à 110 % de la moyenne française selon les estimations.

La mise en œuvre de stratégies ambitieuses sur les pratiques agricoles pour augmenter le stock de carbone dans les sols permettrait également d'assurer un niveau de capture nette d'un volume global annuel équivalent. Mais, là aussi, une mise en œuvre rapide (utile pour compenser le niveau encore élevé de nos émissions dans les prochaines décennies) va de pair avec un essoufflement de la capacité de stockage avant la fin du siècle, lié à la saturation probable des sols en carbone.

La troisième voie (bioénergie avec capture et stockage du carbone ou « BECCS », capture directe et stockage souterrain ou sous forme de matériaux) repose sur des technologies aujourd'hui immatures, et présente des risques qui n'ont pas encore été vraiment évalués contextuellement (peut-on à la fois maintenir la surface forestière traditionnelle, envisager massivement une technologie comme le BECCS, préserver la biodiversité, et développer une agriculture qui favorise – entre autres attentes – la séquestration de carbone dans

les sols ?). En supposant que ces technologies soient disponibles assez rapidement (20 ans ?) et acceptées, quelle pourrait être leur contribution réelle à l'horizon de trois ou quatre décennies ? On peut penser qu'une bonne surprise technologique sur ces solutions impactera plus la capacité à compenser la baisse de performance progressive des puits naturels après 2050, et à offrir des options d'émissions négatives, que la possibilité d'arriver à (ou proche de) la neutralité à l'horizon 2050, puisqu'il faudrait pour cela les déployer dans les prochaines décennies, alors qu'elles ne sont pas prêtes. C'est cette équation qu'il s'agit bien sûr de préciser, en incarnant ces options dans un scénario « réel », dont on comprend l'extension géographique et la dynamique temporelle, pour en évaluer les impacts (volumes, coût, impact environnemental, etc.).

Au-delà de 2050, une agriculture et une forêt bien gérées peuvent, en ordre de grandeur, s'équilibrer, même si le bilan peut se dégrader en fin de siècle, et s'il faut corriger cet équilibre de nos échanges commerciaux. Les objectifs de réduction d'émissions brutes pour l'ensemble énergie/industrie (y compris les soutes internationales) doivent donc être nettement plus ambitieux que ceux envisagés jusqu'ici, même en tenant compte de possibles technologies d'émissions négatives, sans reporter pour autant les échéances.

Politiquement (pour conserver le leadership de l'Accord de Paris sur la dynamique internationale) et stratégiquement (pour bien préparer notre pays aux enjeux de la neutralité), il semble donc important pour tous les pays, et en particulier les pays développés dont la France, qui a affiché une volonté de leadership sur la neutralité carbone :

- d'afficher un objectif aspirationnel de neutralité à 2050 ;
- de chercher à énoncer une vision et des scénarios s'approchant au mieux de cet objectif, et compatibles avec une neutralité réelle dans les décennies qui suivent (voir section 3.4.1) ;
- de proposer des actions de compensations en soutien aux stratégies de neutralité des pays les moins dotés (voir section 3.2.5).

3.2.2 Adopter une comptabilité séparée pour chaque gaz à effet de serre, exprimée en quantités de gaz et non pas en tCO₂eq.

Les trajectoires d'émissions qui ont été utilisées pour déterminer les RCP distinguent les différents gaz et leurs dynamiques propres de réduction. Ce sont ces trajectoires qui alimentent les modèles climatiques, et permettent de déterminer à tout moment une composition de l'atmosphère (en fonction d'un bilan net émissions/destruction) et, compte tenu de leurs contributions différenciées

au forçage radiatif, une évolution climatique. Ces trajectoires sont le plus souvent représentées (notamment dans les travaux du groupe 3 du GIEC) en adoptant une métrique commune qui est la tonne de CO₂ équivalente (tCO₂eq). Or cela ne doit pas faire oublier que le climat décrit en rapport avec la RCP2.6, par exemple, est valide dans un cadre d'hypothèses précis qui comprend une composition atmosphérique donnée. Des scénarios aboutissant à des émissions « identiques » mesurées en tCO₂eq, mais pour lesquels on échangerait massivement des émissions de méthane surabondantes au profit de réductions plus rapides de déforestation par exemple, conduisent à des évolutions de la composition atmosphérique qui n'ont pas été évaluées (et qui, dans ce cas particulier, induiraient un réchauffement plus rapide au cours de ce siècle, comme expliqué dans la Section 1).

De nombreux scénarios ont été historiquement construits en valorisant une métrique commune mais critiquable (le PRG à 100 ans, par exemple), notamment parce qu'elle permettait facilement à des modèles économiques de rechercher des solutions efficaces économiquement (« coût efficace ») (qui, du fait d'une mauvaise interprétation des PRG, ne l'étaient pas). Il est nécessaire de s'écarter de cette approche pour la production de scénarios. Dans cette optique, il n'y a pas d'allocation « descendante » (top down) sectorielle, mais une recherche systématique d'options de réduction pour chaque secteur, et une évaluation ex-post de la stratégie systémique résultante. C'est ce qui est actuellement pratiqué pour la construction des scénarios de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) française.

L'approche sur les gaz doit donc suivre une même logique « ascendante » (bottom up) pour conduire à deux consolidations distinctes. L'une, classique, intersectorielle, pour conduire in fine à un bilan domestique de tous les GES (qu'il faut exprimer, d'une part, en quantités réelles pour chaque gaz, puis si nécessaire en tCO₂e en utilisant le PRG correspondant à l'horizon cible, en utilisant par exemple les abaques produits par Dessus *et al.*, 2017). L'autre, plus délicate méthodologiquement mais absolument nécessaire, de comparaison de la trajectoire pour chaque gaz aux trajectoires globales définies dans un scénario 2°C validé. La difficulté tient évidemment à ce qu'une trajectoire domestique ne peut se décliner homothétiquement à partir d'une trajectoire globale. Mais une discussion sectorielle (par exemple, sur le méthane, on distinguera l'agriculture et l'usage des terres, le système énergétique, et les déchets) assortie d'une approche par attracteur de long terme (voir par exemple la méthodologie utilisée par le réseau DDPP sur les émissions énergétiques)

permet de juger du niveau d'ambition atteint et de sa compatibilité avec les trajectoires 2°C validées par le GIEC. Il sera d'ailleurs très intéressant de consolider ce type de travail lorsque plusieurs pays l'auront fait, afin de discuter (et le cas échéant remettre en cause) des trajectoires globales de GES qui, CO₂ énergétique et forêt mis à part, sont très mal documentées.

3.2.3 Des objectifs sectoriels clarifiés : tendre vers zéro émission dans le secteur de l'énergie (production et consommation), de l'industrie et des déchets, mettre fin à la déforestation et l'artificialisation des sols

L'objectif de neutralité carbone soulève parfois des inquiétudes quant au manque de rigueur d'une approche qui permettrait d'échanger l'ambition de court terme sur les transitions (énergétique, alimentaire, écologique) contre une perspective d'action compensatoire déterritorialisée, ou reportée dans le temps. Pourtant l'examen des travaux du GIEC dans la Section 1 de cette étude montre clairement que les trajectoires aujourd'hui explorées par les scientifiques supposent simultanément de réaliser ces transitions et de leur adjoindre des efforts importants en matière de mobilisation des potentiels de captation naturelle, puis de captation technologique. D'autres travaux ont montré que le relâchement de cette contrainte de court terme nécessiterait de pouvoir mobiliser plus tôt et plus massivement des solutions encore incertaines, avec non seulement des coûts exorbitants, mais surtout un doute sérieux quant à la faisabilité même de telles trajectoires (Gasser *et al.*, 2015).

Plus précisément, les trajectoires étudiées par le GIEC supposent au niveau global de :

- développer d'ici la moitié du siècle un système énergétique mondial zéro émission ;
- stopper la déforestation, l'artificialisation des sols et les sources liées à des changements d'usage des sols (avant de passer à un régime globalement capteur de GES) ;
- réduire à un niveau proche de zéro les émissions issues des déchets agricoles et urbains, les fuites de méthane, les émissions liées aux incendies.

Ces objectifs ambitieux au niveau global se déclinent par définition à l'identique au niveau national (ou à n'importe quelle échelle territoriale ou sectorielle) : pour chaque acteur planétaire, l'objectif « zéro émission » dans ces différents secteurs est un impératif absolu à atteindre vers 2060. On comprend mieux la rationalité de l'objectif que s'est fixé la Suède, et on conçoit par conséquent que plusieurs postures sont nécessaires dans le cadre d'un travail rigoureux.

Rechercher une solution de neutralité tous gaz à l'échelle territoriale, pour des pays dont la dotation en options de séquestration naturelles permettrait d'envisager une moindre décarbonation des activités énergétiques ou industrielles : ce faisant, ces pays se placeraient d'emblée hors des espaces de solutions jusqu'ici explorés par le GIEC, et devraient justifier en quoi leur attitude ne remet pas en question la possibilité d'atteindre la neutralité à l'échelle globale.

Pour des acteurs non étatiques, comprendre que des solutions de compensation acceptables à court et moyen termes ne doivent pas occulter le fait que, par exemple, toute émission de GES d'origine énergétique à une étape quelconque de la chaîne d'approvisionnement, de transformation et de distribution obère la possibilité de revendiquer le caractère « neutre » de l'activité considérée dans le cadre de l'Accord de Paris. Il serait donc important de développer une labellisation et un système d'appellation moins ambigu que ce que nous observons parfois actuellement, sans pour autant décourager des démarches qui cherchent légitimement à compenser des réductions d'émissions aujourd'hui inaccessibles par des actions de qualité au-delà du domaine d'action de la firme.

3.2.4 Adopter un périmètre d'émissions couvrant à la fois les émissions territoriales, les émissions indirectes sur d'autres territoires, et les émissions indirectes liées aux soutes, selon trois registres distincts, et décliner une stratégie distincte sur chaque volet

Les émissions territoriales relèvent clairement de l'action classique de décarbonation domestique, telle qu'envisagée dans les contributions des États : c'est le domaine régalien de la fiscalité, des lois et règlements, de l'action publique, pour gérer son propre patrimoine, mais surtout encadrer les activités productives et la vie des citoyens, guider leurs stratégies d'investissement, influencer leurs arbitrages, transformer les actifs et leur mode d'utilisation. Il faut noter ici que ces émissions comprennent les productions de biens et services destinés à l'export, qui participent de notre modèle économique et de notre prospérité, et sur lesquelles nous avons une influence directe par la régulation des activités productives, mais qui ne participent pas de notre « empreinte carbone » stricto sensu. Ce point est notamment important pour analyser les stratégies de pays tiers, où la spécialisation sur certaines activités exportatrices (aluminium pour l'Islande, élevage bovin pour la Nouvelle Zélande, par exemple) induit une déformation du bilan de GES qui peut justifier une approche différente de la neutralité. À terme, cette question est évidemment

importante pour la France, pays agricole et fortement exportateur, dans une vision où les émissions énergétiques seront devenues marginales. Dans un monde proche de la neutralité, il semble raisonnable de penser que des territoires présenteront toujours des avantages comparatifs (en matière de GES, ou sur d'autres points) justifiant d'une spécialisation des productions, et d'un échange. Un monde global de neutralité n'est donc pas un monde de neutralité locale systématique, mais un monde dans lequel les émissions résiduelles et les puits localisés rendent légitime un déséquilibre local. En clair, il est légitime de rechercher un modèle alimentaire des Français « neutre » compte tenu de son impact sur notre territoire et en dehors de nos frontières ; mais il est tout aussi légitime pour la « ferme France » de travailler à proposer une production agricole efficace en GES et de renforcer une stratégie d'export de certains produits si les bilans comparés le justifient, dès lors que les externalités du transport sont correctement intégrées : dans cette optique, il est logique de retrancher les exports (et d'inclure les imports, là où d'autres seraient plus performants) dans le bilan d'émissions.

Les émissions indirectes rattachées à d'autres territoires informent sur un champ de responsabilité partagée puisqu'elles sont, par ailleurs, couvertes par d'autres contributions et font l'objet de stratégies de décarbonation dans le cadre de l'Accord de Paris. Les suivre permettrait d'informer plusieurs débats : l'influence de nos modes de vie sur notre empreinte carbone (qui peut être en partie ignorée par une comptabilité nationale, compte tenu de la prépondérance des imports dans certains domaines) ; l'impact des marchés internationaux sur la structure de nos émissions totales (en tenant compte, symétriquement, des émissions pour export), mais également le questionnement sur de possibles fuites de carbone. Il faut insister ici sur le fait que la conclusion de l'Accord de Paris doit nous amener à faire évoluer notre approche et, dans un premier temps, notre vocabulaire : dans un monde où tous les pays se sont engagés sur un même objectif en le déclinant dans une contribution nationale témoignant d'un engagement d'action domestique (contrairement à Rio, où l'objectif global n'impliquait pas de responsabilité individuelle précise des pays, ou à Kyoto où une partie du monde restait hors de la bulle des engagements quantitatifs), il n'y a plus à proprement parler de « fuites de carbone ». On peut s'interroger sur les effets économiques et sociaux de délocalisations qui seraient induites par certaines politiques, on peut également questionner l'impact de telles délocalisations de production sur la localisation et le volume (à court

terme) des émissions ; mais, sauf à considérer que certains engagements valent moins que d'autres, on doit reconnaître que toutes ces émissions, où qu'elles se produisent, sont désormais couvertes par un cadre d'engagement multilatéral et d'action domestique. Si une délocalisation d'émissions nous « facilite » la tâche dans le cadre d'une comptabilité purement domestique, elle complique celle de nos partenaires commerciaux, qui devraient trouver là une incitation nouvelle à agir. Dans cet esprit, une stratégie de neutralité doit identifier les initiatives que l'on peut envisager au niveau bilatéral, international ou multilatéral pour influencer les stratégies de décarbonation de nos partenaires commerciaux (fiscalité carbone ou marchés, accords commerciaux multi ou bilatéraux RSE, accords sectoriels, etc.).

Les *soutes (émissions liées aux transports internationaux)* doivent faire l'objet d'une comptabilité séparée également, en ce sens que l'article 4 de l'Accord de Paris invite clairement les pays à s'en préoccuper, mais qu'elles ne sont pas couvertes aujourd'hui par l'outil « contributions nationales », avec une double conséquence : l'absence d'objectif, de cadre effectif d'action et de calendrier sur ces secteurs en cohérence avec l'objectif de neutralité ; mais, également, et c'est nouveau, le risque de mal calibrer les actions envisagées sur les autres secteurs faute de prendre en compte la difficulté à décarboner l'aviation et le transport maritime. En particulier, la position actuelle de l'aviation internationale, qui a défini une stratégie de neutralité faisant la part belle aux compensations, préempte d'une certaine façon un espace convoité également par les développeurs de stratégies nationales, celui des marchés carbone internationaux. Faute d'en tenir compte, ces stratégies pourraient se révéler irréalistes lorsqu'on les consolide à l'échelle globale, faute d'un volume suffisant de crédits dans un monde où chacun joue le jeu de la neutralité. Inversement, leur prise en considération dans les stratégies domestiques peut amener les États à questionner cette stratégie sectorielle, et à se préoccuper plus activement de la faire évoluer. Comme on le verra plus loin, il sera rapidement difficile de chercher à atteindre la neutralité sans réflexion sur les émissions domestiques du secteur aérien.

3.2.5 Développer et promouvoir des compensations transformationnelles

On l'a vu, le rôle (et le volume) des compensations à l'échéance de neutralité devrait être limité, essentiellement voué à équilibrer des échanges internationaux générés par les dynamiques de spécialisation sur les rares secteurs non neutres.

En affichant un objectif aspirationnel de neutralité effective à l'horizon 2050 (ou aussitôt que

possible après 2050), il pourrait toutefois faire sens d'assortir cet objectif d'un programme de compensation visant à équilibrer le bilan d'émissions bien plus précocement, et d'en promouvoir le modèle au sein de la CNUCCC. En effet, dans les décennies qui précèdent, un soutien à la transition bas carbone des économies en développement prend tout son sens. Si l'idée d'une compensation massive en 2050 est artificielle, celle d'une compensation précoce peut être constructive si les domaines d'application de cette transformation sont effectivement transformationnels, et si cette compensation est revendiquée comme une action complémentaire, mais pas au sens comptable : sauf exception, les pays en développement voudront politiquement revendiquer leur bilan d'émissions sans l'augmenter de réductions « financées » comme cela pouvait être le cas pour la mise en œuvre conjointe au sein de l'Annexe 1.

Il ne s'agit pas non plus de financer les « low hanging fruits » comme le craignaient les pays en développement à propos du MDP (approche dont nous avons exposé certaines limites dans la section 1) ; il ne s'agit plus non plus d'intervenir là où les banques de développement et le secteur privé sont déjà présents et efficaces (par exemple, développement du solaire ou de l'éolien). Il s'agirait plutôt d'identifier les secteurs où les transformations vers la neutralité sont réellement difficiles, et d'aider ces transformations à advenir dans les économies en développement à mesure qu'elles sont mises en œuvre dans les pays développés. **Au contraire du MDP, il ne s'agit donc pas de faire ailleurs moins cher pour éviter de faire ici, mais d'aider à faire ailleurs ce que nous faisons ici.**

Si, à Paris, tous les pays se sont engagés à appréhender la transformation de leurs économies à l'horizon de la fin du xx^e siècle, quel que soit leur niveau de développement, ceci a été fait dans le cadre de Rio, qui invite à apporter aux moins dotés le soutien qui leur permettra de mettre en œuvre ces transformations. Au regard des travaux dont nous disposons aujourd'hui, ces initiatives pourraient couvrir des questions aussi différentes que : les stratégies de reconversion industrielles (dans les pays très charbonniers, le blocage aujourd'hui n'est plus la difficulté à développer des actifs zéro carbone, mais la difficulté à fermer les actifs carbonés tels que mines de charbon ou usines d'engrais) ; les transformations agricoles en lien avec la stratégie « 4 pour mille » ; le développement d'infrastructures urbaines (bâtiment, transports) plus efficaces et tournées vers de nouveaux vecteurs énergétiques. En tout état de cause, elles devraient s'appuyer sur les propres stratégies 2050 de ces pays, et les aider à progresser dans leur mise en œuvre.

3.3. Considérer les solutions techniques et les évolutions sociétales

L'objectif est ambitieux, et l'exercice peut encore butter sur deux obstacles symétriques.

1. « La solution magique à long terme » (technologique ou non) qui ferait le pari de la réussite d'options aujourd'hui encore très incertaines et de leur déploiement après la moitié du siècle : cette approche a parfois été privilégiée pour des études cherchant à concilier objectifs ambitieux à long terme et conservatisme immédiat, et confortée par des cadres d'analyse macroéconomiques minimisant les coûts futurs (par le biais des taux d'actualisation relativement élevés). Mais ces études sous-estiment ce faisant les contraintes physiques telles que les potentiels naturels (surfaces disponibles, stockage) ou rythmes de déploiement de technologies dans un système complexe (capacités industrielles, coûts échoués) et omettent le plus souvent d'explorer les conséquences et les solutions possibles si les succès escomptés ne sont pas au rendez-vous : on peut, par exemple, relire avec intérêt les études européennes du début des années 2000 (voir par exemple Commission européenne, 2007), optimistes sur le déploiement de technologies à émissions négatives, et en tirer de précieux enseignements sur la façon dont ont été utilisés les BECCS dans les exercices plus récents.

2. « Le constat d'impossibilité » : en limitant la réflexion aux solutions matures technologiquement et en n'explorant pas suffisamment les opportunités que peuvent ouvrir les changements assez radicaux de modes de production et de consommation, dans leurs dimensions technologiques, économiques et sociétales, on peut faire le constat démobilisateur que l'objectif de Paris n'est pas réalisable, ce qui est le plus sûr moyen de s'en écarter. On a vu ce débat prospérer durant la période qui a précédé le dernier rapport du GIEC, l'inquiétude étant largement alimentée par l'incapacité des outils de modélisation à formuler des réponses à l'objectif climatique au sein du cadre de contrainte qu'ils embarquaient parfois implicitement (croissance économique, niveaux de consommation et modes de vie, demande d'énergie, technologies). Au contraire, considérer que l'objectif demeure souhaitable, et que le but collectif est de s'en approcher le plus possible, confère un rôle différent à la prospective : il s'agit de décrire les conditions de réalisation de cet objectif, puis d'en tirer des enseignements pour l'action politique.

Pour pallier ces deux obstacles, l'adoption d'une approche précautionneuse des nouvelles technologies et la meilleure prise en compte des évolutions

sociétales parfois radicales peuvent s'avérer des approches intéressantes.

Nous avons vu que si les exercices du GIEC nous informent assez précisément sur les évolutions climatiques à venir et, de mieux en mieux, sur les conséquences possibles pour la nature et pour l'humanité, ils demeurent assez frustrants dans leur exploration des conditions de réalisation des scénarios d'émission qui sont derrière les RCP. Une lecture un peu rapide tendrait à donner l'impression qu'il s'agit avant tout de diffuser quelques technologies clés (solaire ou éolien, véhicules électriques ou à l'hydrogène, capture et stockage du carbone et, depuis les dernières séries de scénarios, le BECCS), et que les paramètres clés seraient la date de disponibilité et le coût (parfois très incertains encore) de ces technologies. Pour le reste, le paradigme incarné par beaucoup de modèles utilisés, et confirmé par la méthodologie de construction des scénarios, est plus celui d'une décarbonation du monde actuel (ou d'un monde fictif futur où une partie de la planète se serait développée sur un mode mimétique de celui des pays de l'OCDE) qu'une exploration des grandes transformations socio-économiques déjà en cours et à venir, indépendamment de la sphère climatique. Notons que cette impression est finalement trompeuse, car ces modèles décrivent en fait des solutions où ces technologies nourrissent une demande (énergie, matériaux, biens et services) très largement modifiée par le jeu d'élasticité prix ou revenus sans qu'on ne perçoive à quels changements réels ceci corresponde. Les modifications « sociétales » sont parfois bien présentes derrière les équilibres chiffrés, mais sans qu'elles soient perceptibles, explicites et que leurs implications politiques soient discutées. De façon intéressante, certains exercices récents ont pris le contrepied de ces approches en explorant, par exemple, les conditions de croissance économique dans le respect d'un objectif 2°C : il apparaît que les variables clés de la croissance seraient très différentes de celles qui dominent la réflexion économique aujourd'hui (Guivarch & Pottier, 2017).

Le débat politique est parfois le reflet de ces oppositions, où l'on entend les partisans de la technologie (que l'on pourrait diffuser de manière « neutre » sur les modes de vie ou de production, et dont il faudrait simplement discuter « l'acceptabilité ») et ceux du changement normatif des organisations et des comportements. La radicalité introduite par la question de la neutralité peut bien évidemment exacerber cette opposition artificielle, mais peut également être enfin l'occasion de la dépasser en explorant comment les possibles technologiques, en constante évolution, peuvent s'exprimer dans des sociétés en mouvement, et comment nous pouvons penser collectivement ces évolutions et les

influencer au service de la question climatique, tout en adoptant une approche précautionneuse sur les technologies. Très concrètement, on voit aujourd'hui comment l'évolution des aspirations des populations urbaines, mais également rurales, et l'avènement des TIC bouleverse notre rapport à la mobilité et produit un cadre nouveau d'opportunités, mais aussi de risques, pour un déploiement d'innovations bas carbone dans ce champ : régulées par la valorisation des externalités, la réglementation et la contractualisation, ces innovations (ex : covoiturage, VTC) apportent des réponses nouvelles en faveur d'une mobilité plus inclusive et moins polluante. Mais paradoxalement, leur diffusion spontanée peut conduire à une augmentation nette des émissions. En d'autres termes, leur efficacité peut entraîner d'importants effets rebonds sur la demande de mobilité, mais aussi créer des modèles économiques qui conduisent à renforcer l'exclusion des personnes et des zones marginalisées.

3.3.1. Adopter une approche précautionneuse des nouvelles technologies

Les outils de modélisation évoqués précédemment ont poussé assez loin l'idée d'un changement technique prévisible, disponible, là où les options nouvelles que nous pourrions peut-être mobiliser à 30 ou 40 ans sont encore incertaines quant à leur existence même (au sens de constituer un choix d'investissement industriel ou de consommation courante à cet horizon), leur coût, et parfois controversées quant à leurs risques potentiels. Tel que défini dans l'Accord de Paris, l'objectif de neutralité n'ouvre a priori pas la porte aux options les plus radicales, et parfois inquiétantes, de géo-ingénierie, et propose de jouer sur les émissions et la capture de GES, pas sur les autres paramètres du système. Il reste que des options telles que le CCS, le BECCS, les biocarburants, la viande artificielle, voire quelques options de geo-ingénierie qui pourraient rentrer dans la définition de l'accord comme l'ensemencement des océans pour en maximiser la capacité d'absorption, génèrent des controverses de taille sur la forme des solutions à envisager. Celles-ci peuvent laisser le décideur politique devant une indétermination paralysante : pour les détracteurs du CCS, il n'est d'autre option qu'une sortie rapide des fossiles, au profit d'un système énergétique 100 % renouvelable (ou nucléaire) ; mais d'autres revendiquent au contraire le CCS comme la seule avenue praticable tant notre addiction aux fossiles est grande et leurs qualités intrinsèques difficilement contestables.

Il semble donc nécessaire d'aborder cette prospective sous un angle différent et moins déterministe. Reprenons l'exemple du CCS. La première question sur laquelle il est possible de progresser

est celle de son rôle réel pour une décarbonation presque totale du système énergétique à l'horizon de 30 ans. Plusieurs études semblent confirmer que, même en étant optimiste sur une date de disponibilité industrielle rapprochée, les délais de mise en œuvre de cette solution, de déploiement d'infrastructures de transport, de sites de stockage, la difficulté à transformer des sites existants, ne permettent d'envisager qu'une contribution marginale à l'horizon 2050 (voir la synthèse présentée dans EASAC, 2018). Ceci est d'autant plus vrai que, simultanément, les progrès inattendus sur les renouvelables induisent progressivement une nouvelle « dépendance de sentier » par la technologie, les règles systémiques, les institutions, l'effort d'innovation, qui rend chaque jour plus difficile le retour en force du CCS. Puisque la technologie n'est pas encore disponible, décarboner les systèmes électriques mondiaux sans envisager une réduction drastique du recours au charbon est une voie bien périlleuse pour atteindre la neutralité : l'Allemagne a déjà fait l'exercice pour conclure que les investissements de capture, transport et stockage devraient être engagés sans tarder... ce qui est impossible. Le raisonnement ici s'appuie sur des études dont on peut contester la validité, et l'objectif ici de ce rapport n'est pas de trancher sur l'avenir du CCS. Mais ceci montre que la question n'est pas tant celle d'un pari générique sur la date de disponibilité ou du coût, mais bien celle du rythme de déploiement d'un système technique complexe au sein de systèmes en place ou en émergence, aux dynamiques fort différentes (Europe, Chine, Inde...) et qu'il est d'ores et déjà possible d'instruire. En l'état actuel de la compétition, le rôle du CCCS dans une décarbonation profonde et rapide des systèmes électriques mondiaux semble devoir être très limité. Dans les autres secteurs comme les transports et le bâtiment, où les émissions sont diffuses et les autres vecteurs non carbonés (H₂, méthane, chaleur) encore balbutiants, la contribution du CCS ne peut qu'être limitée.

Inversement, la technologie du CCS conserve un intérêt potentiel sur deux autres créneaux. D'abord, celui de l'industrie lourde, où le déploiement d'alternatives est encore incertain et la question du coût finalement moins cruciale, avec pour conséquence aujourd'hui de considérer que la décarbonation dans ce secteur n'interviendrait alors au mieux que vers la moitié du siècle (ce qui, en soi, justifie que la R&D sur cette technologie soit poursuivie). Ensuite, celui des technologies à émissions négatives (DACCS par exemple), pour lesquelles les questions environnementales doivent être posées en des termes différents : lorsqu'on souhaite produire de l'électricité aujourd'hui, opter pour une solution « fossile et CCS » présente un risque

environnemental si, en cas de fuite, elle conduit à déverser dans l'atmosphère du CO₂ qu'une option renouvelable par exemple aurait permis d'éviter. S'il s'agit au contraire demain de « reprendre » du CO₂ dans l'atmosphère, d'éventuelles fuites de stockage réduisent l'efficacité des technologies et en augmentent le coût, mais ne présentent pas de risque environnemental additionnel.

Ainsi, inscrire la technologie dans l'espace et le temps de déploiement des solutions permet d'apporter des réponses à des questions essentielles pour les 10 à 20 années à venir, quand bien même l'avenir à 50 ans de cette technologie serait encore assez ouvert. De la même manière, point n'est besoin de trouver un accord aujourd'hui entre les promoteurs de la viande artificielle et ceux d'une conversion sur des régimes végétariens (deux options qui, chacune à leur manière, bouleversent notre rapport culturel à l'alimentation) pour tenter de raisonner quel volume et quel modèle d'élevage bovin et ovin nous pouvons/souhaitons conserver (et à quelles conditions) dans un bilan en GES où les émissions agricoles (CH₄ et N₂O) représenteront la part du lion et devront être maîtrisées, et où ce critère constituera un paramètre nouveau et important de la compétition entre territoires et modèles agricoles.

3.3.2. Considérer pleinement et expliciter les évolutions sociétales : vers une exploration prospective des différentes évolutions possibles

Pour aller plus loin dans les stratégies de décarbonation, il apparaît donc nécessaire de **s'éloigner de trajectoires basées presque essentiellement sur des solutions technologiques** (aux niveaux de maturité et de désirabilité différents), et **de prendre en compte**, dans les solutions à mettre en œuvre comme dans les modèles utilisés, l'évolution possible des **modes de vie et des choix de consommation** mais aussi des modes de production, d'échange et de distribution. C'est dans ce cadre que doit se penser le développement de l'innovation, pour exprimer son potentiel, mais également pour en maîtriser les risques éventuels.

Il s'agit dans un premier temps de **légitimer ces variables** comme devant faire partie de l'analyse, sans vision normative ou dogmatique (sortir des oppositions « il faut » versus « on ne veut pas » changer les modes de vie). Et de reconnaître en entrée de raisonnement que ces questions font l'objet de dynamiques de transformation profondes et rapides, **partiellement indépendantes de la question climatique**, sous d'autres influences (technologies, aspirations citoyennes, enrichissement, santé, éthique, etc.) qu'il faut comprendre, anticiper, et le cas échéant orienter.

La **sphère productive**, au-delà de la tertiarisation des économies, peut également connaître des bouleversements majeurs qui sont encore mal anticipés : ruptures sur les filières matériaux, fin des économies d'échelle au profit d'une économie de la diversité relocalisée pour l'industrie manufacturière, économie circulaire, etc., peuvent modifier radicalement les besoins énergétiques de l'activité industrielle et des activités tertiaires liées (transport notamment), facilitant l'adoption de technologies bas carbone.

Il sera difficile d'adopter aujourd'hui des **objectifs quantifiés ambitieux mais crédibles**, tant ces questions sont récentes, controversées, objets d'un débat social encore mal construit et parfois très polémique. Il est en revanche assez inutile de mobiliser très modestement ces leviers dans nos exercices prospectifs, dans l'objectif de ne fâcher personne : l'impact sera bien évidemment faible comparé aux exercices classiques (et l'on court le risque d'un effet retour sur le mode « finalement, ce n'est guère important »), et cela ne permettra pas de sortir d'un schéma de représentation « incrémental » du changement et donc d'explorer réellement les potentialités de ces options : en pratique, qu'apprendrait-on d'un scénario où la consommation de viande rouge des français passerait de 23 à 20 kg en 2050, ou bien dans lequel la mobilité baisserait de 10% ?

Au contraire, Il sera ainsi nécessaire de montrer comment les évolutions des modes de vie et de production pourraient s'articuler avec les options technologiques, et de montrer quelles sont des formes de solutions possibles – en allant au bout des logiques, de leurs opportunités et de leurs risques. Ainsi, entre un scénario dans lequel les Français adopteraient des niveaux de consommation carnés proches de celui des américains aujourd'hui, et des scénarios dans lesquels on aurait 10 % de végétaliens et 50 % de flexitariens dans la population, les options techniques à envisager (viande artificielle ? Élevage en parcours libre avec accès à l'extérieur ?) sont certainement différentes. De même, une augmentation de la demande de mobilité suivant les tendances actuelles peut imposer de changer radicalement les formes de cette mobilité si l'on veut limiter l'emprise sur l'espace, alors que paradoxalement une maîtrise de la mobilité serait davantage compatible avec une reconduction du véhicule individuel tel que nous le connaissons aujourd'hui. On pourra alors faire une prospective pour donner des ordres de grandeur de ces solutions, mais également « donner à voir » les formes d'innovation possibles et questionner les imaginaires (est-ce cette ville-là, cette mobilité-là que je veux ? Quels véhicules devrais-je construire dans 20 ans pour rester compétitif dans ce scénario ?), ainsi que les impacts possibles de ces différents

imaginaires sur les différents objectifs de durabilité prioritaires. À cet effet, des tests de sensibilité pourraient être réalisés, afin d'identifier les stratégies les plus pertinentes du point de vue de l'évolution de la consommation et des modes de production (particulièrement pour les secteurs des transports, de l'agriculture et de l'industrie). Dans cette perspective, les scénarios de long terme sont moins des plans d'action que des invitations à l'exploration systématique des options.

Ces prospectives doivent nous permettre de détecter les dépendances de sentier et les conditions de faisabilité de ces scénarios de long terme (quelles évolutions incontournables dans les 10 ou 15 ans à venir pour que ce scénario soit encore possible ?) communes ou spécifiques. C'est évidemment ce dernier point de la faisabilité qui sera crucial pour l'écriture d'une stratégie d'action résiliente à moyen terme (horizon d'une stratégie nationale bas carbone) qui par définition doit être « unique ».

3.4. Réinventer les processus d'élaboration et de mise en œuvre des scénarios

3.4.1. Construire une vision et des scénarios

Prendre pleinement en considération les évolutions sociétales possibles et les mettre en discussion avec les acteurs concernés nécessite d'adopter une approche renouvelée de construction de scénarios, qui doivent permettre d'explorer des possibles alternatifs, de mettre en débat les options (et d'inviter les parties prenantes à alimenter ce débat), plutôt que de chercher le consensus autour d'une trajectoire « optimale » construite sur des hypothèses de comportement, de performances techniques ou de coûts à 30 ou 40 ans consensuels et très contestables. Devant ces incertitudes, il est préférable d'adopter à ce stade des approches scénarisées (« et si... ») permettant de qualifier et quantifier des espaces de solutions, à mettre en débat.

Ceci n'invalide pas, bien entendu, l'expertise économique, qui intervient à deux niveaux : en entrée, pour « qualifier » les options que l'on peut retenir dans l'espace des solutions comme « économiquement pertinentes » pour un horizon donné (par exemple, on peut dire qu'aujourd'hui le véhicule électrique entre dans cette catégorie, mais peut-être pas la pile à combustible) ; en aval, pour proposer une évaluation économique des scénarios élaborés ; mais pas comme logique génératrice des scénarios.

On comprend que cet exercice n'est pas un projet de 6 mois. En France par exemple, il ne peut être confondu avec l'exercice de révision de la SNBC et

son agenda : travailler à cet objectif de neutralité est un processus plus qu'un exercice, qui doit permettre de préciser progressivement les visions sur les horizons de long terme et d'adapter, en conséquence, le pilotage des transformations pour les années à venir. Il est donc particulièrement important que cette première révision de la SNBC aborde l'exercice dans cette perspective, même si elle doit pour cela ouvrir plus de pistes de travail qu'elle n'apportera de solutions.

La SNBC peut dire « la France s'inscrit dans l'objectif de neutralité, voici le scénario de transition que nous avons adopté et que nous allons mettre en œuvre, et le plan d'action correspondant ». Mais un scénario unique à 2050, au vu des incertitudes actuelles, sera nécessairement fragile, tant politiquement qu'en substance.

Ou elle peut dire « La France s'inscrit dans l'objectif de neutralité, voici notre démarche, une première vision stratégique dont nous allons poursuivre l'instruction et le développement, et voici notre plan d'action compatible avec cette vision pour les 10/15 ans à venir ». Dans cette seconde option, il semble important de s'appuyer, notamment, sur une évaluation non complaisante du chemin parcouru dans la formulation de la stratégie. Celle-ci permettra d'identifier les enseignements utiles pour la préparation de scénarios d'action sur la période de la prochaine SNBC, et les questions dont l'instruction devra se poursuivre dès après juin 2018, au titre de la mise en œuvre de la SNBC, de sorte à être collectivement mieux armés pour aborder la prochaine révision.

Un aspect fondamental pouvant permettre de cadrer le débat et de tenir ensemble la nécessité d'une vision unique et stratégique avec plusieurs scénarios possibles, évolutifs en fonction des tendances sociétales, est de réaliser des tests de cohérence sur les évolutions des modes de vie et de production, permettant de borner l'horizon des possibles, et d'identifier les stratégies les plus pertinentes.

Ainsi, par exemple, une littérature importante a montré la corrélation entre les déplacements effectués par la population et le taux de croissance de l'économie. Les hypothèses d'évolution des déplacements projettent ainsi pour la plupart cette corrélation, remettant peu en question l'explosion des déplacements que cela implique pour des horizons temporels lointains. La mise en discussion de ces hypothèses pourrait permettre d'enrichir, mais aussi de borner l'horizon des possibles.

3.4.2. Articuler plusieurs horizons temporels

La réflexion sur la neutralité carbone sera difficile à mener dans un simple exercice prospectif (« forward looking »), visant la neutralité à partir

de la situation actuelle. On risque, ce faisant, de fermer des pistes face à l'incapacité de les faire accepter comme réalistes, à l'heure de leur prise en compte dans un scénario « central ». Inversement, on devra, faute de se limiter à des options très classiques, faire un certain nombre de paris qui constitueront autant de fragilités. Que l'exercice actuel (scénario avec mesures supplémentaires, ou AMS) soit conçu selon cette approche n'est pas nécessairement problématique, selon le statut que l'on pourra donner à ce premier scénario, et donc la manière dont ce scénario pourra être présenté. Ce scénario représente-t-il la stratégie de neutralité française, conçue en optimisant les options telles que connues aujourd'hui ? Ou est-il une invitation à la recherche, à la créativité et à la proposition de voies alternatives ? Dans ces visions, il est nécessaire d'explorer les incertitudes et les différents équilibres possibles (par exemple, comment répondre à une demande d'électricité plus basse ou plus importante ? Comment compenser une efficacité de la rénovation du bâti moindre que prévu initialement ? Un coût de certaines technologies plus élevé qu'attendu ? Un rejet par les populations de déploiement massif [CCSS, nucléaire, éolien, etc.] ?).

Mais l'exercice doit également produire un cadre politique à l'horizon 2028/30, qui doit s'appuyer sur un scénario unique, stabilisé, objectif, qui servira de cadre de conception, de suivi et d'évaluation des recommandations de la SNBC, des objectifs de la PPE et des autres stratégies sectorielles (mobilité, habitat, etc.). À cet horizon, il faut fixer des objectifs de déploiement, côté offre et côté demande, viser également des infléchissements (ou non) de modes de consommation, et définir les leviers politiques de ces transformations.

Il est donc nécessaire de scinder l'exercice en deux pour conserver l'ouverture politique nécessaire sur la vision de neutralité, et conserver la légitimité collective d'un objectif 2030 et d'une programmation unique. Cette distinction entre vision 2050 et trajectoire cible 2030 est essentielle, car il s'agit pour la SNBC de proposer des objectifs 2030 précis et une politique pour les atteindre, tout en stimulant notre créativité pour rechercher à 2050 des solutions aux contours encore flous.

De préférence à une approche temporelle linéaire, on pourra alors se placer sur des horizons temporels dynamiques, qui prennent en compte l'« après » (après-2030, après-2050...) et la neutralité carbone globale à terme (« le plus tôt possible dans la seconde moitié du siècle »). **Dans cette perspective, on parlera à ce stade de « quasi-neutralité » à l'horizon 2050 pour reconnaître la possibilité que, à cette date, la neutralité ne soit pas totalement atteinte, ou soit**

obtenue sur la base de compensations comptables avec d'autres territoires (voir plus spécifiquement la discussion de ces questions au point 3.6.). Pour chaque horizon, la question posée est celle de la résilience des choix effectués face aux incertitudes sur la période à venir : étant donné l'héritage que je laisse à l'horizon T, serais-je en mesure de poursuivre la transformation dans les différentes configurations possibles ensuite ? On le voit, cette question est différente de la question plus traditionnelle de la robustesse aux hypothèses, qui reste essentielle et vise à évaluer la possibilité d'atteindre les objectifs visés dans un contexte incertain avant l'horizon T.

Le premier scénario élaboré doit permettre de formuler une vision 2050 de la quasi-neutralité, de ses grands équilibres, des choix potentiellement controversés qui auront pu être faits, des paramètres pour lesquels l'incertitude est forte. Il décrira et justifiera le solde d'émissions sectorielles, les solutions de séquestration développées, le recours éventuel à la compensation hors du territoire national. On montrera en quoi les transformations acquises dans chaque secteur en 2050 ne créent pas de verrouillages (« lock in ») par rapport aux solutions de neutralité long terme identifiées. Ceci permettra de « justifier » le bilan d'émissions résiduelles en 2050, entre transformations ambitieuses mais réalistes avant cet horizon et capacité à poursuivre vers la neutralité dans les quelques décennies qui suivront. Supposons, par exemple, que le transport aérien ne soit pas encore entré dans une dynamique massive de transformation (carburants synthétiques ou autre), il serait difficile d'envisager comment cette transformation pourrait être aboutie à l'échelle globale en l'espace de 20 ans. Il faudrait alors expliquer comment l'exploitation d'une flotte carbonée – ici et ailleurs – pourrait s'inscrire dans un équilibre global de neutralité, et voir dans quelle mesure les actions correspondantes ont été prises en compte dans le scénario.

En conformité avec l'objet de la SNBC, on présentera alors la **trajectoire de transformation cible pour 2030, compatible avec l'atteinte de la vision 2050 proposée**. La robustesse de cette trajectoire 2030 pourra être testée sur les paramètres les plus incertains, de sorte à préserver la possibilité d'atteindre l'objectif de neutralité face à de (mauvaises) surprises sur l'évolution réelle de ces paramètres. Si, par exemple, la consommation de produits carnés se maintient à un niveau élevé quand la trajectoire cible projetait une poursuite des tendances actuelles à la baisse, faut-il (pourrait-on) accélérer la décarbonation du secteur des transports compte tenu des parcs et des pratiques visés pour 2030 ? Si le niveau de performance

thermique du parc bâti plafonne, quelles stratégies d'offre décarbonée supplémentaire déployer pour compenser et parvenir quand même à la neutralité globale du secteur ? Ce travail peut conduire à réviser les instruments de politiques sectorielles, d'une part, mais aussi, de façon itérative, à questionner les équilibres identifiés à 2050 et à formuler différemment les priorités sectorielles d'ici 2030 à la prochaine révision (par exemple, entre efficacité des véhicules et changement de paradigme – électricité, H₂/carburants de synthèse, mobilité, etc.).

Cette première proposition de scénario 2050 devrait être le **point de départ d'un travail itératif engageant le monde de la recherche et les parties prenantes sur la durée de la SNBC** (5 ans), et identifié comme tel dans le projet de SNBC (on peut imaginer une recommandation de la SNBC sur ce point). Sur la base des propositions, questionnements et critiques que ce scénario AMS aura pu susciter, de l'exploration des incertitudes qu'il aura lui-même pointées, ce travail pourra conduire à formuler, à l'horizon 2050, des visions et des objectifs de quasi-neutralité différents. Ce travail doit permettre de développer de nouveaux champs de compétence (par exemple, sur les transformations de la sphère productive), d'instruire certaines questions controversées ou incertaines (cf. plus haut l'exemple du CCS), d'identifier et de mieux formuler aussi ce qui relève de choix, de valeurs, que le processus politique devra instruire et trancher. Il pourra servir lors de la prochaine révision à questionner la stratégie de moyen terme, et notamment de déterminer comment la faire évoluer si l'on souhaite conserver certaines options ouvertes (valeurs d'option). Il sera enfin utile de confronter ce travail aux processus en cours dans d'autres pays, de s'interroger sur les convergences/divergences dans les visions développées, et les possibles coopérations notamment à l'échelle européenne.

3.4.3. Mettre en œuvre des politiques publiques : impliquer les territoires infranationaux

Notons, enfin, que le concept de neutralité peut apporter des pistes de solution là où, jusqu'ici, la transcription de stratégies globales ou nationales à des échelles plus petites (villes, petites régions) ou des acteurs de natures différentes (entreprises) posait d'insolubles problèmes. L'allocation d'un objectif de réduction d'émissions à une population d'entités (Régions françaises, entreprises de l'ETS) a toujours été un exercice délicat : comment transcrire des objectifs d'efficacité énergétique, de production de renouvelables, sur un territoire aux caractéristiques aussi différentes que la Bretagne ou Auvergne-Rhône-Alpes ? À qui demander

les efforts ? Côté entreprises, la solution la plus convaincante (la vente de droits aux enchères) ne s'applique vraiment qu'à de grandes firmes intensives en énergie, et à leurs émissions directes. Mais elle est difficile à généraliser à l'ensemble du tissu industriel et n'est d'aucune utilité (au-delà de la formation d'un prix de référence) pour les stratégies de tous les autres acteurs. Au contraire, construire une vision nationale et globale de la neutralité permet à un territoire de penser et visualiser les transformations qu'il doit envisager, les opportunités et les risques qui y sont attachés, en fonction de ses caractéristiques propres. La neutralité est un récit, et il importe que la SNBC « donne à voir » ce récit de transformation sectoriel pour interpeller les territoires, les entreprises et les citoyens, et stimuler leur créativité et leur force de proposition.

Inversement, ces derniers seront bien mieux à même d'évaluer la faisabilité et la désirabilité du récit qui leur est proposé, et d'en formuler des alternatives. C'est d'ailleurs ce qui est à l'œuvre depuis quelques années dans la discussion globale, où grandes villes, États fédérés, régions et grandes entreprises ont entrepris de s'engager sur cette voie, en complément des États. À l'heure de la préparation des schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) en France, une opportunité réelle émerge de mieux articuler les visions régionales et nationales par la convergence des actions de transformation envisagées, et la complémentarité des interventions, plutôt que la répartition des objectifs et de leur réalisation.

Depuis Copenhague, la discussion internationale a été également marquée par l'émergence des acteurs non étatiques dans le champ politique : ces acteurs ne se positionnent plus seulement comme des acteurs de « mise en œuvre », mais interpellent également les acteurs conventionnels sur les visions politiques, les niveaux d'ambition, les pistes à explorer. Pour la première fois, la COP de Paris a donné à ces acteurs une visibilité réelle, un rôle dans la préparation de l'accord, et une place pour la suite. Certains de ces acteurs n'ont pas attendu longtemps pour s'emparer de la question de la neutralité, soit pour en faire un nouvel horizon politique, soit pour lancer une réflexion plus analytique sur les défis à relever. Ceci devrait faire l'objet d'une étude dédiée.

CONCLUSION – LA NEUTRALITÉ CARBONE, UN LANGAGE COMMUN À TRAVERS LES ÉCHELLES

À ce jour, la définition d'objectifs quantitatifs de réduction des émissions à différents niveaux géographiques (États, régions, villes, etc.) n'a pas conduit les différents acteurs impliqués à développer des visions coordonnées avec un horizon temporel commun. Mais la neutralité carbone implique de définir une vision à un horizon temporel suffisamment éloigné pour permettre l'ambition, et assez proche pour permettre sa traduction en mesures opérationnelles, en gardant à l'esprit la durée de vie des décisions actuelles. Dans cette vision, chaque acteur devrait définir sa place dans un monde neutre en carbone, en fonction de ses contraintes, dotations, potentiels, et non seulement (ou nécessairement) viser la neutralité au niveau de ses propres activités.

En offrant un langage commun pour une action climatique ambitieuse, le concept de neutralité carbone peut soutenir l'ouverture d'une discussion à travers les échelles géographiques et

institutionnelles sur les visions des uns et des autres. En fin de compte, un tel processus peut favoriser l'alignement des attentes d'un large éventail d'acteurs, du secteur public et privé, des autorités étatiques et locales, des décideurs politiques et de la société civile.

L'atténuation du changement climatique implique non seulement le déploiement de technologies à faible teneur en carbone, mais aussi la prise en compte des impacts de la modification des modes de vie et de consommation de nos sociétés. À ce jour, des hypothèses comportementales et économiques conservatrices ont servi de base à la modélisation globale d'une décarbonation ambitieuse (Waisman *et al.*, 2018). Mais relever le défi du climat appelle très probablement de profondes transformations sociétales, et la réflexion sur celles-ci est un complément clé pour construire des voies à long terme vers la décarbonation. La notion de neutralité carbone a le potentiel pour initier des discussions sur les transformations possibles concernant les modèles économiques et les modes de consommation, et de renforcer les arguments nationaux en faveur de la protection et de l'amélioration des puits de carbone. ■

RÉFÉRENCES

- Agrawala, S. (1998a). Structural and process history of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climatic Change*, 39(4), 621–642. <http://doi.org/10.1023/A:1005312331477>
- Agrawala, S. (1998b). Context and early origins of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climatic Change*, 39(4), 605–620. <http://doi.org/10.1023/A:1005315532386>
- Anderson, K. (2015). Duality in climate science. *Nature Geoscience* 8, 898–900
- Anderson, K., & Peters, G. (2016). The trouble with negative emissions. *Science*, 354(6309), 182–183. <http://doi.org/10.1126/science.aah4567>
- Aubert, P.-M., Ruat, R., Rankovic, A., Treyer, S. (2016). Which accountability framework and transformational potential of a multi-stakeholder initiative? The case of the 4‰ Initiative. *IDDR Policy Brief N°01/16*, 4pp.
- Austin, K. G., González-Roglich, M., Schaffer-Smith, D., Schwantes, A. M., & Swenson, J. J. (2017). Trends in size of tropical deforestation events signal increasing dominance of industrial-scale drivers. *Environmental Research Letters*, 12(5). <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6a88>
- Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., ... Houghton, R. A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2(3), 182–185. <http://doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Baveye, P. C., Berthelin, J., Tessier, D., & Lemaire, G. (2017). The “4 per 1000” initiative: A credibility issue for the soil science community? *Geoderma*, (May), 0–5. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.005>
- Boffey, D. (2015, décembre 12). Ed Miliband pushes for zero carbon emissions target following COP21. *The Guardian*. Consulté à l'adresse <http://www.theguardian.com/politics/2015/dec/12/ed-miliband-zero-carbon-emissions-target>
- CAT. (2017). Zero Carbon Britain. Making it happen. Center for Alternative Technology / Zero Carbon Britain.
- Cointe, B., Ravon, P.-A., Guérin, E., 2011. 2°C: the history of a policy-science nexus, Working Papers N°19/11, IDDR, Paris, France, 28 p.
- Commission européenne (2007). Production d'électricité durable à partir des combustibles fossiles: Vers des émissions des centrales électriques au charbon tendant vers zéro après 2020. Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen, COM(2006) 843 final, 10 janvier 2007.
- Conseil Européen. (2017). Une meilleure gestion des forêts et des terres dans l'UE pour contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et respecter les engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris - Consilium. Consulté à l'adresse <http://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2017/10/13-lulucf/>
- Crowther, T.W., et al., (2016). Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature* 540, 104–108.
- Culmar, R., & Iken Associates. (2017). A Vision for Britain: Clean, Green and Carbon Free. How to achieve a Net-Zero Carbon Britain by 2050 (Report on behalf of the Liberal Democrats).
- DCCAE. (2014). Climate Action and Low-Carbon Development. National Policy Position Ireland. Department of Communications, Climate Action and Environment Ireland. Consulté à l'adresse <http://www.dcae.gov.ie/en-ie/climate-action/publications/Documents/5/National%20Climate%20Policy%20Position.pdf>
- DCCAE. (2017). National mitigation plan 2017. Department of Communications, Climate Action and Environment Ireland.
- Deep Decarbonization Pathways Project (2015). Pathways to deep decarbonization 2015 report, SDSN - IDDR.
- Dessus, B. Laponche, B. Le Treut, H. (2017). Le méthane, un gaz qui pèse lourd sur le climat. *La Recherche*, n°529, novembre 2017, pp. 68-72
- DLR, Fraunhofer IWES, & IFNE. (2011). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Rapport réalisé pour le Ministère de l'Environnement (BMU).
- EASAC. (2018). Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? EASAC policy report 35 - February 2018. 45 pp.
- Evans, S. (2017). Analysis: UK carbon emissions fell 6% in 2016 after record drop in coal use. *Carbon Brief*.
- Fuss, S., Canadell, J. G., Peters, G. P., Tavoni, M., Andrew, R. M., Ciais, P., ... Yamagata, Y. (2014). Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, 4(10), 850–853. <http://doi.org/10.1038/nclimate2392>
- Gasser, T., Guivarch, C., Tachiiri, K., Jones, C. D., & Ciais, P. (2015). Negative emissions physically needed to keep global warming below 2°C. *Nature Communications*, 6, 1–7. <http://doi.org/10.1038/ncomms8958>
- Gattuso, J. P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F., ... Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO2 emissions scenarios. *Science*. <http://doi.org/10.1126/science.aac4722>
- Global Chance. (2014). La transition énergétique en Suède : un aperçu du modèle scandinave (Les cahiers de Global Chance No. N°36).
- Gouvernement du Costa Rica. (2015). Costa Rica's intended nationally determined contribution. Costa Rica / MINAE.
- Gouvernement Nouvelle-Zélande. (2017). New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990–2015. Consulté à l'adresse <http://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/media/Climate%20Change/FINAL%20GHG%20inventory%20-%2025%20May.pdf>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645–11650. <http://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

- Van Groenigen, J. W., Van Kessel, C., Hungate, B. A., Oenema, O., Powlson, D. S., & Van Groenigen, K. J. (2017). Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma. *Environmental Science and Technology*, 51(9), 4738–4739. <http://doi.org/10.1021/acs.est.7b01427>
- Guillemot, H. (2017). The necessary and inaccessible 1.5°C objective. In Aykut, S. C., Foyer, J. & Morena, E. (Eds). *Globalising the climate. COP21 and the climatisation of global debates*, Routledge, London, 224 pp.
- Guivarch, C., & Hallegatte, S. (2013). 2C or not 2C? *Global Environmental Change*, 23(1), 179–192. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.006>
- Guivarch, C., & Pottier, A. (2017). Climate Damage on Production or on Growth: What Impact on the Social Cost of Carbon? *Environmental Modeling & Assessment*. <http://doi.org/10.1007/s10666-017-9572-4>
- Hassi, S. (2017, février 2). What Finland doesn't want you to know about its forests. Euractiv. Consulté à l'adresse <https://www.euractiv.com/section/climate-environment/opinion/what-finland-doesnt-want-you-to-know-about-its-forests/>
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., ... Simpson, S. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(1), 42–50. <http://doi.org/10.1002/fee.1451>
- IEA. (2017). *New Zealand 2017 Review. Energy Policies of IEA countries*.
- IPCC (2014), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press).
- Karsenty, A., Vogel, A., Angerand, S., Castellanet, C. (2015). Can the REDD+ mechanism and the Payments for Environmental Services (PES) tackle the underlying causes of deforestation? *Les Amis de la Terre - GRET - CIRAD*, 8pp.
- Köhler P. *et al.*, (2010). Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 107, 20228–20233
- Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9(10), 737–742. <http://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Lal, R. (2016). Beyond COP 21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(1), 20A–25A. <http://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A>
- Lucas, P. L., van Vuuren, D. P., Olivier, J. G. J., & den Elzen, M. G. J. (2007). Long-term reduction potential of non-CO₂ greenhouse gases. *Environmental Science and Policy*, 10(2), 85–103. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2006.10.007>
- Mathiesen, K. (2017, octobre 20). Jacinda Ardern commits New Zealand to zero carbon by 2050. Consulté 23 octobre 2017, à l'adresse <http://www.climatechangenews.com/2017/10/20/jacinda-ardern-commits-new-zealand-zero-carbon-2050/>
- MEAE. (2017). *Government report on the National Energy and Climate Strategy for 2030*. Ministry of Economic Affairs and Employment.
- MINAE. (2015). *Costa Rica. Informe bienal de actualizacion ante la Convencion Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climatico*.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., ... Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59–86. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Bornmann, L., & Fuss, S. (2017). Fast growing research on negative emissions. *Environmental Research Letters*, 12(3), 35007. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ee5>
- Öko-Institut. (2016). *Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050*.
- Pirard, R. (2012). *Peut-on sauver les forêts tropicales ?* Presses de Sciences Po, Paris, 218 pp.
- Pratt, L., Rivera, L., & Sancho, F. (2010). *NEEDS Project – National Economic, Environment and Development Study for Climate Change. Options for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions in Costa Rica: Towards Carbon Neutrality in 2021*.
- Prognos AG. (2017). *Evaluierung der StakeholderBeteiligung an der Erstellung des Klimaschutzplans 2050*.
- Psarras *et al.*, (2017). Slicing the pie. How big could carbon dioxide removal be? *WIREs Energy and Environment* 6, e253
- Pye, S., Li, F. G. N., Price, J., & Fais, B. (2017). Achieving net-zero emissions through the reframing of UK national targets in the post-Paris Agreement era. *Nature Energy*, 2, 17088.
- Seyller, C., Desbureaux, S., Ongolo, S., Karsenty, A., Simonet, G., Faure, J., & Brimont, L. (2016). The “virtual economy” of REDD+ projects: does private certification of REDD+ projects ensure their environmental integrity? *International Forestry Review*, 18(2), 231–246. <http://doi.org/10.1505/146554816818966336>
- van Sluiseveld, M. A. E., Martínez, S. H., Daioglou, V., & van Vuuren, D. P. (2016). Exploring the implications of lifestyle change in 2°C mitigation scenarios using the IMAGE integrated assessment model. *Technological Forecasting and Social Change*, 102(2016), 309–319. <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.08.013>
- Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 22(3), 1315–1324. <http://doi.org/10.1111/gcb.13178>
- Smith, P. *et al.* (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6(1), 42–50. <http://doi.org/10.1038/nclimate2870>
- Soussana, J. F., Lutfalla, S., Smith, P., Lal, R., Chenu, C., & Ciaia, P. (2017). Letter to the Editor: Answer to the Viewpoint “sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma.” *Environmental Science and Technology*, 51(20), 11502. <http://doi.org/10.1021/acs.est.7b03932>

- Spencer, T., Pierfederici, R. *et al.*, (2015). Beyond the numbers: understanding the transformation induced by INDCs, Study N°05/15, IDDRI - MILES Project Consortium, Paris, France, 80 p.
- Stern, N. (2016). Current climate models are grossly misleading (vol 530, pg 407, 2016). *Nature*, 531(7592), 31.
- Teagasc. (2013). Carbon-Neutrality as a horizon point for Irish Agriculture A qualitative appraisal of potential pathways to 2050.
- Torney, D. (2017). If at first you don't succeed: the development of climate change legislation in Ireland. *Irish Political Studies*, 32(2), 247-267. <https://doi.org/10.1080/07907184.2017.129913>
- UBA. (2014). Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Umweltbundesamt.
- UK CCC. (2016). UK Climate action following the Paris Agreement. UK Committee on Climate Change.
- van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G. J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., ... van Ruijven, B. (2011). RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, 109(1-2), 95-116. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0152-3>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Birchall, J. (2014). New Zealand's abandonment of the Carbon Neutral Public Service programme. *Climate Policy*, 14(4), 525-535. <https://doi.org/10.1080/14693062.2014.877224>
- Vaughan, A. (2016, mars 14). Zero carbon emissions target to be enshrined in UK law. *The Guardian*. Consulté à l'adresse <http://www.theguardian.com/environment/2016/mar/14/zero-carbon-emissions-target-enshrined-uk-law>
- Victor, D. (2015). Climate change: Embed the social sciences in climate policy. *Nature*, 520(7545), 27-29. <http://doi.org/10.1038/520027a>
- VividEconomics. (2017). Net zero in New Zealand.
- Waisman *et al.*, (2018). Constructing national 2050 pathways to meet the goals of the Paris Agreement. En révision
- WELT, D. (2016, novembre 8). Klimaschutzplan 2050: Gabriel blockiert Klimaplan und brüskiert Hendricks. *DIE WELT*. Consulté à l'adresse <https://www.welt.de/politik/deutschland/article159356655/Gabriel-blockiert-Klimaplan-und-brueskiert-Hendricks.html>
- Yle. (2017, février 21). Environment Minister: Finland carbon neutral by 2045. Consulté 23 octobre 2017, à l'adresse https://yle.fi/uutiset/osasto/news/environment_minister_finland_carbon_neutral_by_2045/9469850

La neutralité carbone, défis d'une ambition planétaire

Clarifications conceptuelles, panorama des initiatives
et recommandations pour les stratégies nationales

Aleksandar Rankovic, Michel Colombier, Andreas Rüdinger,
Marie-Hélène Schwoob, Oliver Sartor, Sébastien Treyer, Lola
Vallejo & Henri Waisman (Iddri)

PUBLICATIONS DE L'IDDRI

- Vallejo, L. *et al.*, (2018). Carbon neutrality: taking on the global challenge for ambitious climate action. Iddri, *Policy Brief* N°04/18.
- Rüdinger, A. (2018). Le suivi et l'évaluation de la transition bas-carbone en France. Iddri, *Study* N°07/18.
- Argyriou, M. *et al.*, (2016). The impact of the Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP) on domestic decision-making processes – Lessons from three countries. Iddri, *Issue Brief* N°11/16.

Publications disponibles en ligne sur : www.iddri.org

Institut de recherche indépendant, l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri) a pour objectif de favoriser la transition vers le développement durable et la prospérité pour tous. L'Iddri identifie les conditions nécessaires pour que le développement durable soit intégré aux politiques publiques et propose des outils pour leur mise en œuvre. Il intervient à différents niveaux, de la coopération internationale aux politiques des pays, villes et entreprises. L'Iddri constitue une plateforme pour faciliter un dialogue transparent entre toutes les parties prenantes (recherche et communauté académique, gouvernements, société civile, secteur privé), tout en garantissant un apprentissage mutuel et la pertinence de ses recherches.

Ses travaux s'articulent autour de quatre agendas thématiques : climat, vers des sociétés résilientes et bas carbone ; biodiversité et écosystèmes, identifier les leviers de changement ; océan, vers une coopération renforcée pour une gestion durable et équitable des ressources marines ; gouvernance du développement durable, les innovations pour le développement durable.

Fondation reconnue d'utilité publique, l'Iddri participe activement au débat sur les politiques publiques, à l'échelle internationale et nationale, et met à la disposition de tous, via son site Internet, ses différentes analyses et propositions, et les partage lors de conférences et séminaires.

Pour en savoir plus sur les activités et les publications de l'Iddri, visitez www.iddri.org

www.iddri.org

